



# **Direktbestromung von Kohlenstofffasern zur Minimierung von Zykluszeit und Energieaufwand bei der Herstellung von Karbonbauteilen**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr.-Ing.

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität Augsburg

von

**Dipl.-Ing. Alexander Hemmen**

Friesoythe, Juni 2016



Erstgutachter:

Prof. Dr. Michael Kupke

Zweitgutachter:

Prof. Dr. Siegfried Horn

Tag der mündlichen Prüfung:

26.08.2016

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit ist nebenberuflich zu meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Premium AEROTEC GmbH in Varel im Zeitraum von Juli 2012 bis Juni 2016 entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Hilmar Apmann für die Kontaktherstellung zur Universität Augsburg sowie Herrn Prof. Dr. Michael Kupke für die Betreuung dieser Arbeit und die interessanten, vertiefenden Gespräche zum Thema.

Außerdem möchte ich an dieser Stelle ein sehr großes Dankeschön meiner Familie für die Unterstützung und die Akzeptanz durch die zusätzlichen Einschränkungen während der Erstellung dieser Arbeit aussprechen.





## Kurzfassung

Die Nachfrage an Leichtbauteilen aus Kohlenstofffaserverbund mit dem Fokus auf Energieeinsparung ist in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Die Herstellung derartiger Bauteile ist gegenwärtig jedoch noch sehr zeit-, kosten- und energieintensiv. Die Ausnutzung der elektrischen Leitfähigkeit der Kohlenstofffasern des herzustellenden Bauteils zur direkten Erwärmung durch Joulesche Wärme zeigt diesbezüglich einen vielversprechenden Lösungsansatz.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit Aufheizversuche durch direkte Stromeinleitung durchgeführt, wobei der Strom sowohl in Kohlenstofftrockenfasern geleitet wurde als auch in Faserhalbzeuge, die in thermoplastischer Matrix eingebettet waren. Das Ziel dabei war, erste Erkenntnisse über das sich einstellende Erwärmungsverhalten zu gewinnen. Es konnte eine homogene Aufheizung in Dicken- und Breitenrichtung sowie eine wesentliche Aufheizratensteigerung bei gleichzeitiger Reduktion des benötigten Energieaufwandes beobachtet werden. Darauf aufbauend wurde eine Strom-einleitungssteuerung erarbeitet und erprobt, mit der es möglich ist, sehr variabel asymmetrische Faserlagenaufbauten homogen oder definiert partiell zu erwärmen. Zudem konnte gezeigt werden, dass über den eingeleiteten Strom in Kombination zur gemessenen Spannung Rückschlüsse auf die aktuelle Temperatur der Kohlenstofffasern sowie des Erweichungszustandes der Matrix bei Organoblechen getroffen werden können.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in industrialisierbare Fertigungskonzepte zur effizienten Erwärmung für das automatisierte Preforming, der Umformung von Organoblechen sowie dem RTM-Fertigungsprozess überführt. Deren Funktionalität wurde im Anschluss anhand entsprechender Versuchsaufbauten getestet. Es konnte gezeigt werden, dass es mit dem gewählten Ansatz möglich ist, den thermoplastischen Anteil eines Kohlenstoffhalbzeuges bereits während des Transportes zügig und homogen zu erwärmen. Die Potenziale eines selbst entwickelten Fertigungskonzeptes, das auf Injektions-formschalen mit integrierten Elektroden zur direkten Stromeinleitung in den Faserpreform basiert, konnten durch Versuche deutlich herausgestellt werden. Mit einer derartig revolutionären Werkzeugkonzeptionierung ist erstmals eine variotherme Prozessführung unter ökonomischen sowie ökologischen Gesichtspunkten für ein Injektionsverfahren anwendbar. Die Herstellungszeit sowie der notwendige Energiebedarf von derart gefertigten Bauteilen kann so drastisch verringert werden.

Im Anschluss an die Untersuchungen wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, welche die entwickelten Fertigungskonzepte den etablierten Verfahren bzgl. Zykluszeit, Energiebedarf sowie Investitionshöhe gegenüberstellt. Das Einsparungspotenzial der neuen Fertigungskonzepte mit direkter Stromeinleitung ist hinsichtlich Herstellungskosten (Ersparnis von 70 %), Zykluszeit (Ersparnis von 72 %) und Energie (Ersparnis von 97 %) als außerordentlich hoch einzuordnen.



## Abstract

The demand for lightweight components of carbon composites with the focus on saving energy has risen strongly in the past years. The production of appropriate components is still highly time-consuming, cost- and energy-intensive. Utilizing electrical conductivity of carbon composites of the component in production, being effected by caloric energy, shows hereof a solution to equalize the deficiencies.

In this thesis heating attempts at dry fibers and in thermoplastic matrix of embedded fiber semi-finished material were accomplished in order to extract first realizations of the adjusting warming up behavior. A homogeneous heating in thickness and width direction as well as a substantial heating rate increase could be observed by simultaneous reduction of necessary energy expenditure. In addition a current control unit was compiled and established which permitted homogeneous or defined partially heating up of complex or asymmetrical fiber layups. Furthermore, it was proofed that the adjusted amperage in combination with measured voltage of thermoplastic matrix reinforced carbon fiber semi-finished material conclusions on its softening condition can be determined.

Conclusion of the efficient warming up strategy were transferred to new adjusted manufacturing concepts for automated preforming as well as to the forming production of thermoplastic CFRP and to the RTM manufacturing process having its functionality practically demonstrated on experimental setups. Evidence was successfully proofed that the chosen concept is able to quickly and homogenously warm up the thermoplastic part of a fiber composite, during transport. For the resin injection process insulating injection cast shells with integrated copper contacts were developed to clearly perform using this prototype in the experiment. On this account, it is possible for the first time to realize an economic and an ecological variothermic process with production time and required energy expenditure by RTM components being drastically reduced.

Based on the described investigations, an economic analysis was accomplished to measure the developed manufacturing concepts in comparison to the established procedures concerning cycle time, power requirement as well as financial investment. The saving potential of the new manufacturing concepts with direct current introduction regarding manufacturing costs (saving 70 %), cycle time (saving 72 %) and energy (saving 97 %) can be determined as extraordinarily high.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen .....</b>	<b>iv</b>
<b>Lateinische Formelzeichen .....</b>	<b>v</b>
<b>Griechische Formelzeichen.....</b>	<b>vii</b>
<b>1 Motivation.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>4</b>
2.1 Faserverbundwerkstoffe.....	4
2.2 Matrixwerkstoffe.....	6
2.3 Fertigungsverfahren für Kohlenstofffaserbauteile .....	8
2.3.1 Prepreg-Verfahren.....	9
2.3.2 Infusionsverfahren .....	11
2.3.3 Injektionsverfahren .....	12
2.3.4 Verfahren zum Umformen von Organoblechen.....	22
2.4 Erwärmungsvarianten .....	24
2.4.1 Kontaktheizung .....	24
2.4.2 Infrarotstrahler .....	25
2.4.3 Mikrowelle .....	28
2.4.4 Induktion .....	29
2.4.5 Direktbestromung .....	30
<b>3 Aufgabenstellung.....</b>	<b>32</b>
<b>4 Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>34</b>
4.1 Aufbau von Kohlenstofffasern.....	34
4.2 Herstellung von Kohlenstofffasern .....	36
4.3 Elektrische Leitfähigkeit .....	39
4.4 Kontaktierungsvarianten .....	40
4.5 Wärmeentwicklung im Kontaktierungsbereich .....	42

<b>5</b>	<b>Thermodynamische Beschreibung .....</b>	<b>45</b>
5.1	Energieflussbetrachtung.....	45
5.2	Thermodynamische Modellbildung .....	48
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>60</b>
6.1	Thermische Leitfähigkeiten orthogonal zur Faserorientierung.....	60
6.2	Elektrodenkonfiguration .....	62
6.3	Wärmeeinfluss auf elektrische Leiteigenschaften.....	69
6.4	Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern .....	70
6.5	Thermische Eigenschaften von Fasermatrix-Verbunden.....	79
<b>7</b>	<b>Geometrieangepasste Erwärmung von Trockenfasern.....</b>	<b>83</b>
7.1	Gesteuerte Erwärmung.....	83
7.2	Homogene Erwärmung asymmetrischer Zuschnittgeometrien.....	85
7.3	Erwärmung integraler und lokal verstärkter Geometrien .....	90
7.4	Optimierte Preformtopologieerstellung .....	93
7.5	Energieverbrauch des optimierten Preformingprozesses .....	97
<b>8</b>	<b>Homogene Erwärmung von Organoblechen.....</b>	<b>100</b>
8.1	Einflussermittlung von Matrixwerkstoffen .....	100
8.2	Organoblech mit Kohlenstofffasergelegen .....	105
8.3	Optimierter Umformungsprozess von Organoblechen .....	113
8.4	Energieverbrauch einer optimierten Organoblecherwärmung.....	117
<b>9</b>	<b>Effektive Erwärmung im RTM-Prozess.....</b>	<b>123</b>
9.1	Injektionsformschalen zur Stromeinleitung in den Preform .....	123
9.2	Variotherme Prozessführung .....	126
9.3	Harzflussbeeinflussung durch angepasste Bestromungsmuster.....	128
9.4	Ansatz eines optimierten RTM-Fertigungsprozesses .....	129
9.5	Energieverbrauch des optimierten Harzinjektionsverfahrens .....	133
<b>10</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....</b>	<b>137</b>
10.1	Preformherstellungsprozess .....	138

10.2	Organoblechumformung .....	141
10.3	Injektions- und Aushärteprozess .....	143
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>148</b>
11.1	Zusammenfassung.....	148
11.2	Ausblick .....	151
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>153</b>
<b>13</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>163</b>
13.1	Übersicht der verwendeten Laborgeräte .....	163
13.2	Leistungsübersicht der verwendeten Labornetzgeräte .....	165
13.3	Datenblätter HTS-Testmaterial .....	166
13.4	Prüfkörper: Kohlenstofffasergewebe in Thermoplastmatrix .....	167
13.5	Prüfkörper: Kohlenstofffasergelege in Thermoplastmatrix .....	168
13.6	Bedienoberfläche zur gesteuerten Stromeinleitung .....	169
13.7	Schaltplan für Kontaktklemmensteuerung.....	170



## Abkürzungen

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
Å	Ångström [ $1\text{Å} = 10^{-10}\text{ m} = 0,1\text{ nm}$ ]
AFP	Automated Fiber Placement
Al	Aluminium
CAD	Computer-Aided Design
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstoffverstärkter Kunststoff
CF/TP	Kohlenstoffverstärkter Thermoplast
CMC	Ceramic Matrix Composites
C/SiC	Langfasern aus Kohlenstoff (C) mit Matrix aus Siliziumcarbid (SiC)
EE	Endeffektor
EP	Epoxidharz
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HM	High Modulus
HP-CRTM	High Pressure Compression RTM
HP-IRTM	High Pressure Injection RTM
HST	High Strain
HT	High Tenacity
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IM	Intermediate Modulus
IMI	In Mould Impregnation
IR	Infrarot
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LKV	Laminier- und Klebevorrichtung
MPP	Mesophasenpech
NCF	Non Crimp Fabric
NTC	Negative Temperature Coefficient
OWZ	Oberwerkzeug

pA	Pneumatischer Aktuator
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PES	Polyethersulfon
PF	Phenol-Formaldehydharz
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
RTM	Resin Transfer Moulding
SQRTM	Same Qualified Resin Transfer Moulding
T-CF	Thermoplastbinder appliziert auf Kohlenstofffaser
UHM	Ultra High Modulus
UP	Ungesättigte Polyesterharze
UWZ	Unterwerkzeug
VAP	Vacuum Assisted Process
VE	Vinylesterharz
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
WZ	Werkzeug
WZOT	Werkzeugoberteil

---

## Lateinische Formelzeichen

$a$	Temperaturleitfähigkeit
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
$A_T$	Tragende Fläche
$A_w$	Wirksame Kontaktfläche
$c$	Lichtgeschwindigkeit
DC	Direct Current (Gleichstrom)
$E_A$	Aktivierungsenergie
$F$	Kraft

$Gr$	Grashof-Zahl
$h$	Wirkungsquantum
$I$	Stromstärke
$k_B$	Boltzmannkonstante
$K_{T_{CFK}}$	Übergangsgröße für Kohlenstofffasern in thermoplastischer Matrix
$K_{t_{CF}}$	Übergangsgröße für trockene Kohlenstofffasern ohne Matrix
$k_{T_{CFK}}$	Kenngroße für Kohlenstofffasern in thermoplastischer Matrix
$k_{t_{CF}}$	Kenngroße für trockene Kohlenstofffasern ohne Matrix
$K_z$	Permeabilität des trockenen Faserhalbzeuges in Dickenrichtung
$L$	Charakteristische Länge
$l_0$	Anfangsmesslänge
$m$	Masse des Körpers
$Nu$	Nusselt-Zahl
$\Delta p$	Druckdifferenz
$P$	Leistung
$P_{ab}$	Nutzleistung
$Pr$	Prandl-Zahl
$P_{theo}$	Theoretische Leistung
$P_V$	Verlustleistung
$P_{zu}$	Zugeführte Leistung
$\dot{q}$	Wärmestromdichte
$\dot{q}_{ab}$	Absorbierte Strahlung
$\dot{q}_e$	Emittierte Strahlung
$\dot{q}_{el}$	Elektrischer Verbrauch der IR-Strahler
$\dot{q}_r$	Reflektierte Strahlung
$\dot{q}_t$	Transmittierte Strahlung
$\dot{q}_V$	Verluststrahlung
$Q$	Übertragene Wärmemenge
$\dot{Q}_K$	Wärmestrom durch Konvektion
$\dot{Q}_S$	Wärmestrom durch Strahlung

$\dot{Q}$	Wärmestrom
$R$	Elektrischer Widerstand
$Ra$	Raleigh-Zahl
$R_E$	Engewiderstand
$R_F$	Fremdschichtwiderstand
$R_H$	Temperaturabhängiger Widerstand
$R_K$	Durchgangswiderstand
$R_N$	Nennwiderstand
$t$	Zeit
$\Delta t$	Zeitintervall
$T$	Betriebstemperatur
$\nabla T$	Temperaturgradient
$T_g$	Glasübergangstemperatur
$T_N$	Nenntemperatur
$U$	Energie
$U$	Spannung
$W$	Arbeit
$\Delta z$	Fließweg

---

## Griechische Formelzeichen

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_K$	Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion
$\alpha_S$	Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung
$\beta$	Kubischer Wärmeausdehnungskoeffizient
$\varepsilon$	Emissionsgrad
$\eta$	Wirkungsgrad
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\nu$	Viskosität

$\varphi$  Faservolumenanteil

$\psi$  Fasermassenanteil

## 1 Motivation

Durch das wachsende Umweltbewusstsein spielen neben den ökonomischen Aspekten heutzutage zunehmend auch die ökologischen Anforderungen an neue Produkte eine entscheidende Rolle [1]. Gesetzliche Restriktionen zum maximalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß sowie die Reduktion des Flottenverbrauchs stimulieren zusätzlich die Verwirklichung von innovativen Leichtbaukonzepten. Die europäische CO<sub>2</sub>-Verordnung sieht beispielsweise vor, die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der europäischen Pkw-Neuwagenflotte von derzeit 130 g/km auf maximal 95 g/km für 95 % aller neuen Autos bis Ende des Jahres 2020 zu begrenzen [2]. Nach 2020 müssen dann alle Neuwagen diesen Grenzwert einhalten [2]. Gleichzeitig steigt der Einfuhrpreis für Rohöl stetig, und zwar von 1999 (122,7 €/t) auf 2014 (554,94 €/t) um fast das Fünffache [3]. Die Bedeutsamkeit der Energieeffizienz lässt sich auch anhand der dafür vorgesehenen Ausgaben für Energieforschung aus Bundesmitteln ableiten, die von 1999 (13,7 Mio. €) bis 2014 sukzessive um mehr als das Dreizehnfache auf 187,3 Mio. € erhöht wurden [4]. Diese Fakten und Zahlen induzieren zum einen eine steigende Nachfrage des Endkunden nach energieeffizienteren Transportmitteln; zum anderen drängen sie die Industrie dazu, über die Eignung neuartiger Werkstoffe zur Gewichtsreduktion ihrer Produkte nachzudenken, die mit einer Energieeinsparung sowie Drosselung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes einhergeht.

Eine kraftflussgerechte Auslegung von Bauteilen und die praktische Realisierung dieser mittels ausgewählter, anisotroper Werkstoffe ist meist der Schlüssel zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Leichtbauartikel. Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe besitzen das größte Potenzial zur Umsetzung von Leichtbaukonstruktionen und erlangen aufgrund ihrer hervorragenden Kennwerte derzeit Einzug in die Großserienproduktion zur Herstellung von Fahrzeugkomponenten [5]. Mit einem faserverbundgerechten Bauteildesign lassen sich Gewichtsreduktionen von 30 % gegenüber Aluminium und 70 % gegenüber Stahl verwirklichen [6]. Die Verarbeitung dieser Verbundwerkstoffe ist gegenwärtig jedoch noch mit hohen Fertigungsaufwendungen und Energiekosten verbunden, da die Technologie noch relativ jung und deren Potenziale erst ansatzweise erkannt und ausgeschöpft werden. Oftmals wird die Entwicklung eines innovativen Leichtbauerzeugnisses aus Wettbewerbsgründen vor dessen zugehörigen Herstellungsprozess priorisiert. Demzufolge werden folgende Kostensenkungspotenziale entlang der Wertschöpfungskette für Faserverbundkunststoffe bis 2020 erwartet: Carbonfaser 15 – 25 %, Glasfaser 5 – 10 %, Matrix < 10 %; bei den Herstellungsverfahren zur Bauteilgenerierung rechnet man mit einem Kostensenkungspotenzial von 30 – 40 % [7].

Dennoch rentieren sich bereits in der heutigen Zeit diese höheren Herstellungskosten für viele Leitbaustrukturen mit Blick auf die resultierenden verminderten Treibstoffverbräuche über die Gesamtlebensdauer des jeweiligen Produktes. Der Effekt der Einsparung je kg ist dabei umso höher, je dynamischer beschleunigt und je größer die angestrebte Lebenszykluszeit ist [8]. Eine Amortisationsrechnung aus der Luftfahrtindustrie zeigt, dass beispielsweise eine Gewichtseinsparung von 1 kg bei einer Betriebsdauer von 60.000 Stunden zu einer Kerosineinsparung von ca. 3 t führt. Bauteilmehrkosten von 400 – 500 € je eingespartem Kilogramm Gewicht lassen sich somit rechtfertigen [7].

Damit neben den ökologischen auch die ökonomischen Effekte bei der Herstellung von Kohlenstofffaser-Matrix-Verbunden besser ausgenutzt werden, sind automatisierte Großserienprozesse zielführend. Bezüglich der damit verbundenen Herausforderung der sicheren und wiederholgenaueren Handhabung der biegeschlaffen Faserhalbzeuge hat es in der vergangenen Zeit viele Fortschritte gegeben [9, 10]. Jetzt gilt es, den Bauteilherstellungsprozess als solchen zu optimieren, um höhere Stückzahlen von mindestens 100.000 Bauteilen pro Jahr herzustellen und Produktions- sowie Energiekosten bei der Produktgenerierung zu minimieren [11].

Die Anforderungen, die ein neuartiger Werkstoff an die Bauteilfabrikation stellt, unterscheiden sich oftmals stark gegenüber bereits etablierten Verfahren. Verbundbauteile mit Kohlenstofffasern erfordern, je nach angedachtem Einsatzgebiet, die Aufwendung von hohen Temperaturen, was einen erhöhten Energieverbrauch im Produktionsprozess der Leichtbauartikel zur Folge hat. Der hohe Temperaturunterschied in dessen Herstellung ist notwendig, um zum einem bei Thermoplasten den Formgebungsprozess deutlich von den für das Bauteil anvisierten Einsatztemperaturen zu differenzieren und zum anderen die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) der duromeren Matrix ausreichend hoch einzustellen. Ein hoher  $T_g$ -Wert ist notwendig, um eine Schwächung der mechanischen Eigenschaften infolge von höheren Umgebungstemperaturen durch Erweichung vorzubeugen [12].

Neben den speziellen Forderungen zur optimalen Endproduktgenerierung bringt ein verschiedenartiger Ausgangswerkstoff aber auch neue Eigenschaften mit sich, die auch anderweitig sinnvoll genutzt werden können. Untersuchungen haben ergeben, dass die difizile Ermittlung der Schädigung im Inneren von CFK-Werkstoffen durch systematische Aufzeichnung und Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit des Bauteils möglich ist [13, 14, 15]. Dazu wird der elektrische Widerstand bzw. die Impedanz im CFK-Bauteil an unterschiedlichen Stellen gemessen. Aus diesen registrierten Werten können dann über eine In-situ-Überwachung durch deren Änderung im Bezug zu vorherigen Kalibrierungswerten das Dehnungsverhalten sowie örtliche Faserschädigungen abgeleitet werden. Zusätzlich applizierte Sensoren zur Detektion von auftretenden Belastungen oder eventuellen Schädigungen können durch Nutzung der lasttragenden Kohlenstofffasern als Sensoren somit eingespart werden. Bauteilversagen, das durch Schädigungen in

der Matrix durch beispielsweise interlaminare Rissausbreitung induziert wird, kann mit dieser Methode jedoch nicht detektiert werden, da hierbei der gefährliche Riss um die Verstärkungsfasern herumläuft. Für Glasfaserverbundwerkstoffe wurde diesbezüglich bereits eine Lösung entwickelt, bei der die elektrische Leitfähigkeit einer Duromer-matrix durch eine definierte, minimale Beimengung von Kohlenstoff-Nanopartikeln (Hochleitfähigkeitsruß) erreicht wird [16]. Durch die erstellte leitfähige Matrix wird eine sehr genaue In-situ-Überwachung der Deformation und interlaminaren Rissausbreitung im Faserverbund ermöglicht.

Einen anderen Ansatz, die elektrischen Leiteigenschaften der Kohlenstofffasern zu nutzen, wird durch eine definierte Stromeinleitung in diese verfolgt. Durch die entstehende Joulesche Wärme werden diese direkt aufgeheizt, sodass sie als externe bzw. separate Widerstandsheizung eingesetzt werden können. Die in Formwerkzeugen mit Strom durchflossenen Kohlenstofffasern werden deshalb bereits zur Erzeugung der notwendigen Prozesstemperatur für eine GFK- oder CFK-Bauteilproduktion genutzt. Durch diese an das aufzuheizende Bauteil anliegenden Heizelemente entstehen jedoch Verlustleistungen, eine homogene Erwärmung des Halbzeuges in Dickenrichtung ist aufgrund der schlechten Wärmeleiteigenschaften quer zur Faserrichtung schwieriger, und der Aufheizprozess dauert zudem länger, als wenn die Energie direkt in das Bauteil eingeleitet werden würde. Aus diesem Grund gibt es erste Konzepte mit Kohlenstofffaserhalbzeugen, die eine direkte Stromeinleitung in diese vorsehen, um so den Erwärmungsprozess zu optimieren [17, 18].

Die Idee, die elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffaserbauteilen auszunutzen, ist folglich nicht neu. Betreffend der Nutzbarkeit einer derart optimierten, effizienten Erwärmung für die CFK-Bauteilherstellung sind dessen Einflussfaktoren bisher noch unzureichend bekannt, weshalb entsprechende Konzepte auch erst rudimentär bzw. nur im Labormaßstab umgesetzt wurden. Für eine sinnvolle Entwicklung und Auslegung entsprechender Fertigungssysteme, die auf eine direkte Stromeinleitung basieren, fehlt das detaillierte Wissen über das genaue Verhalten von Kohlenstofffasern sowie über die Einflussgrößen betreffend der jeweiligen Halbzeugart.

Aus diesem Grund soll im Folgenden eine Direktbestromung von Kohlenstofffaserhalbzeugen der zu produzierenden Produkte für die Herstellung von Karbonbauteilen zwecks Minimierung von Energie- und Zeitaufwand detailliert untersucht und entwickelt werden.



## 2 Stand der Technik

Im Lebenszyklus eines Bauteils schließt sich nach dessen möglichst günstiger und energieaufwandsreduzierter Produktion die Nutzungsphase an. Es existieren derzeit verschiedene Ansätze, das Gewicht von Bauteilen zwecks Energieeinsparung während dieser Phase zu reduzieren. Bei metallischen Produkten können durch gezielte Legierungsauswahl und geschickte Gefügeeinstellungen (durch mechanische und/oder thermische Behandlungen) die Eigenschaften optimal auf die geforderten Kennwerte eingestellt werden [19]. In der Metallindustrie werden zunehmend sogenannte Tailored-Blank-Blechplatten eingesetzt, die aus verschiedenen Blechdicken oder Werkstoffgüten zusammengesetzt sind und zum Bauteil umgeformt ihre Anwendung finden [20]. Ein derart lokal abgestimmter Werkstoff kann dann im Bauteil auf minimale Einsatzmasse reduziert werden, da der Materialausnutzungsgrad besonders hoch ist und somit die Masse des verwendeten Materials lokal die gestellten Anforderungen bestens erfüllt [21].

Bei der Erzeugung belastungsoptimierter Strukturen, die Anwendung im extremen Leichtbau finden sollen, wird heutzutage vermehrt auf Faserverbundwerkstoffe zurückgegriffen. Die verbreitetsten Verstärkungsfasern zur Armierung von duromeren oder thermoplastischen Matrices sind Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern [12]. Für diese Faserverbundbauteile wurden zwischenzeitlich ebenfalls Tailored NCFs entwickelt, mit denen im Halbzeug die Faserorientierung, Drapierbarkeit sowie Materialdicke örtlich angepasst werden können. Neben den erzielbaren Gewichtsoptimierungen der Bauteile reduzieren sich die Handhabungsschritte sowie der anfallende Verschnitt, wodurch die Herstellungskosten gesenkt werden können [22, 23].

Oftmals werden Hohlstrukturen generiert, um die Beul- und Biegesteifigkeit von Leichtbauprodukten bei minimalem Gewichtszuwachs zu erhöhen (z. B. Tennisschläger, Fahrradrahmen). Diese Bauteile sind mit kraftaufnehmenden, festen Decklagen gefertigt, die meistens durch einen leichten Kernwerkstoff auf Abstand gehalten werden. Als Kernwerkstoffe finden üblicherweise Schaum- oder Wabenkerne Anwendung im Bauteil [24]. Eine Fertigung derartiger Körper ohne verbleibenden Kernwerkstoff ist auch möglich, jedoch oftmals in der Herstellung aufwendiger [25]. Mithilfe von im Bauteil verbleibenden oder herauslösbaren Formkernen können Faserverbundbauteile mit komplexen Innenstrukturen erstellt werden, wodurch der Integrationsgrad eines Bauteils stark erhöht und unnötiges Gewicht gegenüber einer sonst notwendigen differenziellen Bauweise eingespart werden kann.

### 2.1 Faserverbundwerkstoffe

Der große Vorteil von Faserverbundwerkstoffen ist die Möglichkeit der Kombination verschiedenartiger Materialien in einem Werkstoffverbund. Ihre besonderen Eigenschaften beziehen die Faserverbundwerkstoffe dabei aus den hervorragenden mechanischen Kennwerten, wie einer hohen Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer

Dichte. Die Anzahl, Art und Orientierung der Verstärkungsfasern kann je Bauteilgeometrie und berechneter Lastpfade angepasst werden, wodurch das resultierende Gesamtgewicht minimalisiert wird. Erst der Zusammenschluss von Faser und Matrix gestattet jedem Material seine Stärke optimal der Vereinigung beizusteuern. Gleichzeitig können dessen vermeintliche Schwächen durch die Kooperationspartner weitestgehend kompensiert werden [12]. Die Zusammenstellung der jeweiligen Verbundpartner kann je nach angedachtem Einsatzgebiet angepasst werden, wobei die verteilten Hauptfunktionsaufgaben stark variieren können.

Die primäre Aufgabe der Matrix besteht in der Fixierung der Fasern in der gewünschten geometrischen Anordnung und in der Übertragung der Kräfte auf und zwischen den Fasern und Schichten. Ferner dient die Matrix der Stützung der Fasern bei Druckbeanspruchung in Faserrichtung und dem Schutz der Fasern vor den Einwirkungen der Umgebungsmedien, wie Feuchtigkeit oder Chemikalien. Da die auf den Verbund einwirkenden Kräfte primär durch Schubspannungen in die Faser eingeleitet werden, ist eine optimale Lastübernahme nur bei vollständiger Benetzung der Fasern gewährleistet [26]. Bei keramischen Verbundwerkstoffen (Ceramic Matrix Composites, kurz CMC) bestehen die Fasern wie auch die Matrix – im Gegensatz zum CFK – aus spröden Materialien. Durch eine optimierte Einstellung der Faser/Matrix-Bindung ist es aber möglich, den aus spröde brechenden Einzelkomponenten bestehenden Verbundwerkstoff quasiplastisches Bruchverhalten zu entlocken. Dies wird dadurch erreicht, dass Risse sich nicht wie bei monolithischer Keramik unaufhaltsam durch das ganze Bauteil fortsetzen, sondern durch mikromechanische Effekte – wie „Faser-Pull-Out“ und Rissumlenkung an inneren Grenzflächen – umgelenkt oder gegebenenfalls sogar aufgehalten werden [27]. In der Raumfahrt werden diese Werkstoffe – vor allem nichtoxidische CMC, deren SiC-Matrix mit Kohlenstofffasern verstärkt sind (C/SiC) – als Hitzeschutzschilder an Raumtransportern verwendet, die beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre einer sehr starken Belastung durch die entstehenden hohen Temperaturen durch Reibung an der Luftatmosphäre ausgesetzt sind. Im Rennsport und in Schnellzügen kommt dieser Werkstoff aufgrund seiner geringen Dichte, seinem geringen Reibverschleiß sowie seiner hohen Thermoschockbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Bruchzähigkeit als Bremsscheibe zur Anwendung [8].

Für strukturelle Leichtbauanforderungen in der Luftfahrt und Automobilindustrie wird heutzutage vermehrt auf Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe zurückgegriffen. Die Kohlenstofffaser zählt zu den hochwertigsten Fasern, ist elektrisch leitend und besitzt neben einer hohen Festigkeit eine sehr hohe Steifigkeit. Aufgrund der Vielzahl der angebotenen Faserarten – High-Tenacity(HT)-, High-Modulus(HM)-, Ultra-High-Modulus(UHM)-, Intermediate-Modulus(IM)- und High-Strain(HST)-Fasern –, die sich in der Reinheit der ausgebildeten Graphitebenen unterscheiden, kann für jeden Anspruch die geeignete Faser gewählt werden [12]. Diese Fasern können als unidirektionale Rovings direkt kraftflussgerecht abgelegt oder um einen Kern gewickelt bzw. geflochten werden

[28]. Eine andere zweckmäßige Herangehensweise ist die Weiterverarbeitung dieser Rovings zu flächigen Halbzeugen, wie Geweben oder Gelegen. Bei Geweben werden parallel verlaufende Kettfäden mit rechtwinkligen Schussfäden verwebt, wodurch eine Leinwand-, Köper- oder Atlasbindung entsteht [29]. Neben optischen Effekten können durch die Wahl der Gewebeart die Schiebefestigkeit und Drapierfähigkeit des Halbzeugs, die sich konträr zueinander verhalten, eingestellt werden.

Gelege bestehen aus mehreren Lagen mit jeweils parallel angeordneten Faserrovings, die sich je Faserlage entsprechend dem angedachten Anwendungsfall in ihrer Orientierung unterscheiden können. Zur besseren Handhabung sind mehrlagige Halbzeuge oft zu einem multiaxialen Gelege verwirkt. Je nach Anzahl der verwirkten, unterschiedlichen Orientierungen werden diese beispielsweise als bidiagonales oder quadraxiales Gelege bezeichnet [30], die neben anderen Gewebearten in den hier behandelten Aufheizversuchen verwendet werden. Im Vergleich zu Geweben haben Gelege im Verbund bessere mechanische Eigenschaften, da die Fasern in gestreckter anstatt in ondulierter Form vorliegen. Sind die Halbzeuge ausgewählt, so werden diese zugeschnitten, definiert übereinandergestapelt und dann dem CFK-Fertigungsprozess zugeführt. Je nach Fertigungsverfahren sind die Verstärkungsfasern vor dem Aufeinanderstapeln bereits mit der Matrix imprägniert (Prepreg-Verfahren) oder werden anschließend damit infiltriert (z. B. per VAP-Verfahren (Vacuum Assisted Process)) oder injiziert (z. B. per RTM-Verfahren (Resin Transfer Moulding)) [31].

## 2.2 Matrixwerkstoffe

Bei Faserkunststoffverbundbauteilen besteht die Matrix aus Polymeren. Dabei wird zwischen Duromeren, Elastomeren und Thermoplasten unterschieden. Im strukturellen Leichtbau finden hauptsächlich die Duromeren und Thermoplaste als Matrixwerkstoffe Anwendung, während die Elastomere in Dämpfersystemen, Dichtungen, Reifen usw. zu finden sind. Zu den gebräuchlichsten Thermoplasten für Standardanwendungen gehören Polypropylen (PP) und Polyamid (PA). Für Hochleistungsanwendungen wird dagegen eher auf Polyetheretherketon (PEEK), Polyphenylensulfid (PPS), Polyetherimid (PEI) oder auch Polyethersulfon (PES) zurückgegriffen [30]. Während beispielsweise PA 66 heutzutage primär in der Automobilindustrie als thermoplastische Matrix in Faserverbundbauteilen zur Anwendung kommt, nutzt man in der Luftfahrtindustrie eher hochwertige PPS und PEEK [32] zurückgegriffen. Im Vergleich zu anderen Polymeren zeichnen sich PPS und PEEK, neben den hervorragenden mechanischen Eigenschaften, durch hohe Wärmeformbeständigkeit und geringer Entflammbarkeit sowie geringer Rauchgasentwicklung aus. In der nachstehenden Tabelle 2.2-1 sind ausgewählte und in

den folgenden praktischen Versuchen verwendete Matrixsysteme mit ihren Hauptparametern zusammengefasst dargestellt.

Parameter	PA 66	PPS	PEEK
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,14	1,35	1,31
E-Modul [GPa]	1,7	3,3	4,3
Zugfestigkeit [MPa]	57	78	115
Bruchdehnung [%]	26...75	20...30	16...80
Schmelztemperatur [°C]	220...235	285	343
Temperaturbeständigkeit kurzzeitig [°C]	180	260	310
Dauertemperaturbeständigkeit [°C]	75...85	190	220...260
empfohlene Umformtemperatur [°C]	k. A.	330 ± 15	425 ± 15
dynamische Glasübergangstemperatur [°C]	45...65	k. A.	143
spezifische Wärmekapazität [J/(g·K)]	1,7	1,83	0,32
Wärmeleitfähigkeit [W/(K·m)] bei 23°C	0,28	0,30	0,25

Tabelle 2.2-1: Richtwerte ausgewählter thermoplastischer Matrixwerkstoffe [12, 30, 33, 34, 35, 36]

Im Gegensatz zu Thermoplasten sind Duromere nach der Aushärtung nicht wieder aufschmelzbar und können somit nicht erneut verarbeitet werden, sondern zersetzen sich oberhalb der Zersetzungstemperatur [37]. Bei den Duroplasten gehören Epoxidharze (EP), ungesättigte Polyesterharze (UP), Phenolharze (PF) und Vinylesterharze (VE) zu den bekanntesten Matrixwerkstoffen [30]. Bei der Verarbeitung von duromeren Harzsystemen ist zu beachten, dass es zu einem Viskositätsanstieg während des Aushärtungsprozesses kommt, was zu einer Begrenzung der Verarbeitungszeit führt. Bei einkomponentigen Harzsystemen wird die Reduzierung der Matrixviskosität durch Erhöhung der Harztemperatur erreicht, was aber gleichzeitig eine Steigerung der Vernetzungsgeschwindigkeit und Kürzung der Topfzeit mit sich bringt. Mit dem Fokus auf eine kostengünstige Bauteilfertigung für Faserverbundwerkstoffe sind neben geringen Rohstoffkosten, kurze Zykluszeiten, niedrige Maschineninvestitionen sowie kurze Maschinenbelegungszeiten wünschenswert.

Aktuell wird in der Luftfahrtindustrie als duroplastische Matrix beispielsweise das einkomponentige Harzsystem RTM6 der Firma Hexcel für Flugzeugbauteile verwendet, weshalb mit Fertigungszeiten von mehreren Stunden je Bauteil zu rechnen ist [38]. In anderen Branchen, wie beispielsweise in der Automobilindustrie, werden Mehrkomponenten-Harzsysteme – allerdings mit niedrigeren mechanischen Anforderungen – bereits für CFK-Großserienprodukte eingesetzt. Hiermit werden aktuell Fertigungszeiten

für die Matrixinjektion und Aushärtung eines beispielsweise 500 g schweren Faserverbundbauteils von weniger als drei Minuten bei einer eingestellten Glasübergangstemperatur von 120 °C realisiert [39].

## 2.3 Fertigungsverfahren für Kohlenstofffaserbauteile

Es existieren heutzutage verschiedene Verfahren, um ein qualitativ hochwertiges Leichtbauprodukt aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen herzustellen. Die Eignung dieser hängt unter anderem von der Wahl des Halbzeuges, der Größe des Bauteils und der Stückzahl ab. In der Luftfahrtindustrie werden Kohlenstofffaserbauteile mit Abmaßen von mehr als 140 m<sup>2</sup> bei einer Konturgenauigkeit von  $\pm 0,35$  mm gefertigt [40]. Das Formwerkzeug kann vorzugsweise entweder aus identischem Material (CFK) oder aus einem Material mit annähernd identischem Wärmeausdehnungskoeffizienten (z. B. Ni33 oder Ni36) hergestellt werden, um die Wärmeausdehnung des Formwerkzeugs im Aushärtungsprozess gegenüber den Kohlenstofffasern auszugleichen [41]. Werkzeuge, die im Vergleich zum herzustellenden Bauteil aus anderen Materialien – wie beispielsweise Stahl oder Aluminium – gefertigt werden, müssen bei der Konstruktion um den differierenden Wärmeausdehnungsfaktor bezogen auf die Aushärtetemperatur angepasst konstruiert und gefertigt werden.

Die extremen Toleranzanforderungen, gepaart mit dem zur Gewichtsreduktion komplexen Faserablageplan, machen ein geschlossenes Werkzeugkonzept für größere Bauteile wirtschaftlich unattraktiv. Aus diesem Grund werden größere Bauteile, wie sie in der Luftfahrtindustrie üblich sind, mittels einseitiger Formwerkzeuge, sogenannte Open-Mould-Verfahren, hergestellt [41, 42]. Die Kohlenstofffasern der Außenhaut einer Flugzeugrumpfschale werden zum Beispiel vorzugsweise in einer Laminier- und Klebevorrichtung (LKV) abgelegt, welche die äußere aerodynamische Form des Bauteils starr abbildet und somit die Mastergeometrie vorgibt. Mit wachsender übereinander abgelegter Lagenanzahl, die voll automatisiert mittels einer Automated-Fiber-Placement (AFP)-Anlage abgelegt werden können, erhöht sich der Dickenfehler orthogonal zur Formgeometrie der LKV. Dies begründet sich vor allem durch die Toleranzen der Halbzeugherstellung sowie den Ablegeungenauigkeiten der AFP-Anlage [41]. Lokale Verstärkungslagen sind besonders kritisch, wenn diese außerhalb der vorgegebenen Toleranz gesetzt werden, da diese dann Überpressungen oder Harzansammlungen induzieren können und somit das Bauteil unbrauchbar machen [43]. Für geschlossene Aushärtewerkzeuge addiert sich demzufolge die Fertigungstoleranz der unteren Formhälfte zu

den Toleranzen der abgelegten Fasern und der Fertigungstoleranz des Deckels. Zur Vermeidung der Entstehung von derartig induzierten Überpressungen werden lokale Verstärkungslagen meist „interleaf“ zwischen zwei äußere Faserlagen in Rampenform eingelegt, wodurch eine harte stufenförmige 90°-Kantenpaarung zwischen Faserhalbzeug und Werkzeugformfläche vermieden wird [8]. Des Weiteren wird ausreichend Raum – durch Aufweichung von Toleranz im Werkzeug – für die entsprechende Topologie vorbehalten. Eine Herabsetzung dieser Fertigungstoleranzen durch Vergrößerung der entsprechenden Taschen im Werkzeug hat jedoch den Nachteil, dass der Faservolumengehalt des zu fertigenden Bauteils sinkt und demzufolge dessen Gewicht ansteigt. Ein weiterer Nachteil für starr geschlossene Aushärteformen ist, dass für größere Bauteile die Herstellkosten zur Erzeugung der engen Toleranzen überproportional ansteigen.

Demgegenüber haben halb offene Verfahren den Vorteil, dass sie nach einer Seite bzgl. Faserrampen und lokalen Verstärkungslagen flexibel diese herstellungsbedingte Toleranz ausgleichen können [42]. Fehlplatzierte Faserlagen führen somit im Aushärteprozess nicht zwangsläufig zu Überpressungen oder einen erhöhten Harzanteil. Aus diesen Gründen werden größere Bauteile mittels einseitig starren LKV ausgehärtet, während die gegenüberliegende Seite flexibel mittels Vakuumfolienaufbau kompaktiert wird. Im eventuell folgenden Fügeprozess müssen die entsprechenden Fügeflächen, welche im Aushärteprozess der flexiblen Seite zugewandt waren, jedoch nachgearbeitet bzw. die Lücken zwischen den zu fügenden Bauteilen mit einem Füllstoff ausgefüllt werden.

Das bekannteste Verfahren, das auf vorimprägnierten Faserhalbzeugen basiert, ist das Prepreg-Verfahren. Weltweit werden heutzutage mehr als die Hälfte der Carbonfasern im Prepreg-Autoklav-Verfahren zu CFK-Bauteilen verarbeitet. In der Luftfahrtindustrie kommt dieses Verfahren bei ca. 90 % der hergestellten Faserverbundbauteile zur Anwendung [44].

### 2.3.1 Prepreg-Verfahren

Bei der Erzeugung von Bauteilen mit vorimprägnierten Faserhalbzeugen werden diese im ersten Prozessschritt auf eine Form definiert abgelegt. Zur Minimierung des Bauteilgewichtes wird meist auf unidirektionalen Prepreglagen zurückgegriffen, die den vorberechneten Kraftflusslinien folgend orientiert abgelegt werden können. In einem automatisierten Ablegeprozess wird die Matrix der einzelnen Tows vor der direkten Applizierung der Lagen auf der eingetrennten LKV leicht angeschmolzen (z. B. durch IR-Heizstrahler), um ein Verrutschen der positionierten Fasern zu verhindern. Durch eine erhöhte Anpresskraft werden diese dann orthogonal zur Formoberfläche auf Sollposition angedrückt und abgerollt [42]. In der folgenden Abbildung 2.3-1 ist der automatisierte Prepreg-Ablegeprozess von Kohlenstofffasern eines Rumpfschalensegmentes mit

einer aktuellen AFP-Anlage der Firma M.Torres mit einem Ablegewechselkopf dargestellt.

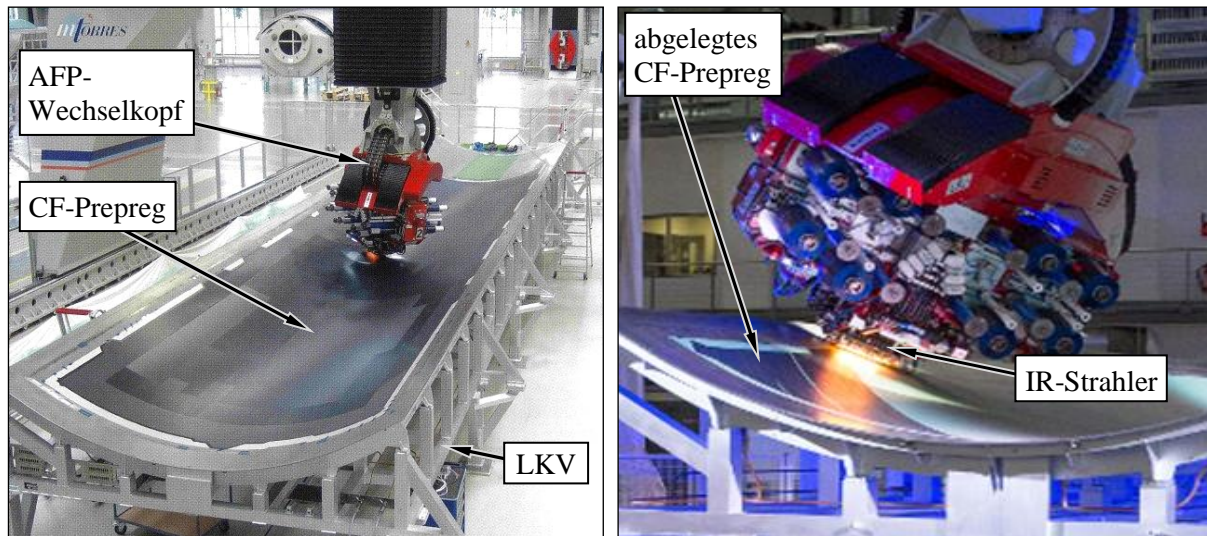


Abbildung 2.3-1: AFP legt Kohlenstofffaser-Prepreg auf eine LKV aus Ni36 ab (links) [45] und AFP-Wechselkopf mit Kohlenstofffaserrollen und IR-Heizung (rechts) [45]

Der Vorformling wird Lage für Lage übereinander mit meist unterschiedlichen Orientierungen aufgebaut, um für alle potenziellen Lastrichtungen die entsprechend notwendige Faseranzahl und Orientierung in das entstehende Bauteil zu implementieren. Zum Teil werden auch Zusatzlagen eingearbeitet, die einen beim nachfolgenden Aushärtungsprozess prognostizierten Verzug – aufgrund eines ansonsten unsymmetrischen Lagenaufbaus – entgegenwirken [42]. Zur weiteren Optimierung werden lokale Verstärkungslagen an strukturell höher beanspruchten Stellen eingebracht, die entweder direkt mit abgelegt oder zur Zykluszeitreduktion aus bereits vorbereiteten Patches gebildet und dann auf den Lagenaufbau appliziert werden.

Die finale Kompaktierung und Aushärtung des Faservorformlings erfolgt dann meist in einem Autoklaven. Die Größe des Autoklaven richtet sich dabei nach dem größten herzustellenden Bauteil samt zugehöriger Laminier- und Klebevorrichtung. Wird das gesamte Bauteilspektrum betrachtet, das über einen längeren Zeitraum gesehen in einem vorhandenen Autoklaven ausgehärtet werden soll, so ist dieser für eine Vielzahl zu groß und benötigt demzufolge per se mehr Energie und Zykluszeit als ein entsprechend auf die jeweilige Größe angepasstes System. Neu entwickelte Autoklaven temperieren deshalb nicht mittels heißer Umluft, sondern über Mikrowellen und können dadurch dieses Defizit reduzieren. Des Weiteren wurden Out-of-Autoklav-Verfahren entwickelt, um den teuren und zeitaufwendigen Autoklavprozess einsparen zu können. Für den Aerospace-Sektor wurde diesbezüglich VAP entwickelt und ist dort bereits ein langjährig erprobter Fertigungsprozess [46].



### 2.3.2 Infusionsverfahren

Zu den bekanntesten auf Infusion basierenden Fertigungsverfahren gehört VAP. Dabei werden abgelegte Trockenfasern unter einer Vakuumhaube und verschiedenartigen Hilfsmitteln kompaktiert. Reaktionsgase und Lufteinschlüsse, die bei der Infusion entstehen, können zu Fehlstellen im fertigen Bauteil führen. Beim VAP werden mittels einer semipermeablen Membran, die gasdurchlässig und gegenüber Matrixmaterial undurchlässig ist, während und nach dem Infusionsvorgang durch Unterdruck diese Gaseinschlüsse großflächig aus dem Harz herausgezogen. Mit diesem Verfahren können Porositätswerte unter 0,3 % sowie ein Faservolumengehalt mit einer Genauigkeit von bis zu 1 % erreicht werden [46]. Ein äußerer Druckaufbau ist nicht notwendig, weshalb eine Temperierung im Ofen oder auf einem eigenbeheizten Werkzeug ausreicht [47]. Der prinzipielle Aufbau zum Infiltrieren des Kohlenstofffaserhalbzeugs nach dem VAP-Verfahren ist in Abbildung 2.3-2 mit den dafür notwendigen Hilfsstoffen dargestellt.

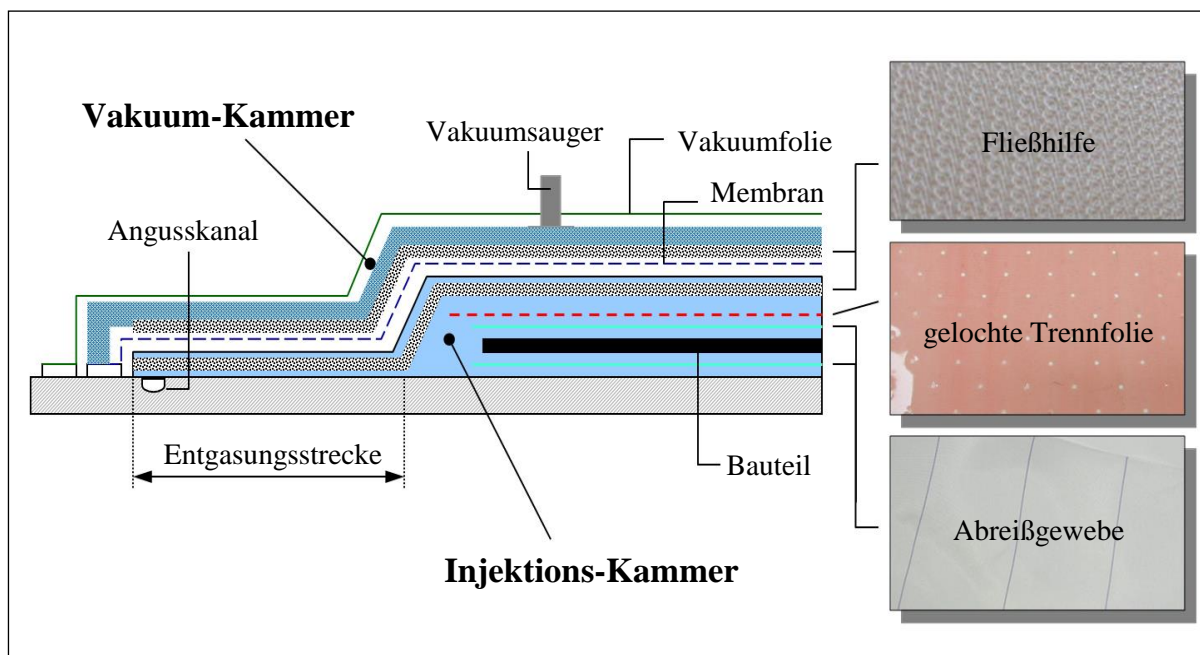


Abbildung 2.3-2: VAP-Vakuumaufbau mit dafür notwendigen Hilfsstoffen [48]

Mit diesem Verfahren ist eine wirtschaftliche Serienfertigung auch komplexer und integral versteifter Luftfahrtbauteile mit höchsten Qualitätsanforderungen möglich. Im Jahre 2009 präsentierte die Premium AEROTEC GmbH zum Beispiel das Frachttor des Transportflugzeugs Airbus A400M in VAP®-Technik mit einer Größe von 7 m x 4 m. Damit ist es das größte derart gefertigte Integralbauteil, bei dem die Längsversteifungen („Stringer“) und Außenhaut („Skin“) in einem Schuss injiziert wurden [49]. Für größere Stückzahlen und kleinere, reproduzierbare Bauteile sind derartige Verfahren allerdings aus wirtschaftlicher Sicht nicht immer zielführend. Durch die Anwendung moderner



Varianten, die beispielsweise auf dem Resin-Transfer-Moulding(RTM)-Prozess basieren, kann die Anzahl an teuren Hilfsstoffen sowie die benötigte Zykluszeit gesenkt werden.

### **2.3.3 Injektionsverfahren**

Für die Produktion von CFK-Bauteilen in Großserie hat sich das RTM-Verfahren durchgesetzt [50]. Bei diesem Prozess werden die Faserschichten einzeln oder als Vorformling, dem sogenannten Preform, zwischen zwei Formhälften eingelegt, die dann durch Injektion oder über Vakuum mit Harz injiziert werden [51]. Durch das Grundprinzip der zwei gegenseitigen Werkzeughälften, das sogenannte Closed-Mould-Verfahren [41], wird eine doppelseitige Gutseite erzeugt, wodurch Nacharbeiten für Fügeoperationen minimiert werden. Die Werkzeugformen bestehen für kleinere Losgrößen zumeist aus Verbundwerkstoffen, um die Produktionskosten niedrig zu halten. Für größere Stückzahlen werden aufgrund der höheren Verschleißfestigkeit die in der Anschaffung teuren, metallischen Werkzeuge aus Aluminium oder Stahl herangezogen.

Die größte Herausforderung bei diesem geschlossenen Werkzeugkonzept ist der Einschluss von Luft innerhalb des ausgehärteten Bauteils. Deshalb wird die Kavität meistens vor der Harzinjektion mit Unterdruck beaufschlagt und mit entgastem Harz injiziert [42]. Zur Zykluszeitreduktion und Qualitätssteigerung der Erzeugnisse existieren bereits zahlreiche Weiterentwicklungen des herkömmlichen RTM-Prozesses, wie beispielsweise das High Pressure Injection RTM (HP-IRTM), das High Pressure Compression RTM (HP-CRTM) [52] oder das Spaltimprägnierungsverfahren [31, 53]. Die Herstellungskosten für die Produktion von qualitativ hochwertigen CFK-Bauteilen der Luftfahrtindustrie sind derzeit noch sehr hoch, sodass die Entwicklung durch Substitution des üblichen Autoklavprozesses zum sogenannten Same-Qualified-Resin-Transfer-Moulding(SQRTM)-Verfahren vorangetrieben wird [54]. Mit diesem geschlossenen Verfahren können qualitativ hochwertige Bauteile unter Verwendung von qualifizierten Prepregmaterial ohne einen Aushärtungsprozess im Autoklaven hergestellt werden. Die einfache Prozesskette für ein RTM-Rohbauteil beginnt mit dem Zuschnitt des Faserhalbzeuges, dem Erstellen der dreidimensionalen Preformgeometrie, der Platzierung dieser in einer temperierten Kavität, der Durchführung des Injektionsvorgangs und schließt mit der Entformung des ausgehärteten Faserverbundbauteils.

#### **2.3.3.1 Preforming**

Bei komplexeren Bauteilgeometrien ist ein Vorformen der Verstärkungslagen in definierter dreidimensionaler Form zu einem Preform unumgänglich [51]. Für das voll automatisierte Erstellen von Preforms existieren bereits die ersten industriellen Anlagen

(z. B. KV298 der Firma Rucks Maschinenbau GmbH). Die Kohlenstofffaserzuschnitte werden dort zu definierten Lagenaufbauten übereinandergelegt, den sogenannten Carbonstacks. In einem Ofen werden diese dann über Konvektion zur Binderaktivierung vollflächig erwärmt und anschließend in einer Umformpresse von einem 2D-Zuschnitt zu einem 3D-Preform umgeformt [50]. Zur optimierten, vollflächigen Erwärmung muss das Greifsystem den Erwärmungsraum meist aufgrund seiner Baugröße verlassen und nach erfolgter Temperierung den Carbonstack erneut greifen, um diesen dann in die Umformstation zu platzieren. Ein linearer Aufbau einer eigenen Versuchsanlage zur Preformherstellung mittels speziell entwickelten Transferschweberahmen mit niedriger Bauhöhe ist in der Abbildung 2.3-3 (links) zu sehen. Der geometrieoptimierte sowie bebinderte Kohlenstofffaserzuschnitt wird in die mit Zugfedern und Linearführungen ausgestattete Spannvorrichtung aufgenommen. Der in Abbildung 2.3-3 (links) dargestellte Schweberahmen zeigt die für die ersten Versuche erstellte manuelle Einspannvariante. Die integrierten Zugfedern gewährleisten dabei die faltenfreie Abspannung des Faserzuschnittes sowie die Minimierung der Abstände der übereinanderliegenden Lagen zueinander, um den Erwärmungsprozess der innen liegenden CF-Lagen durch IR-Heizfelder zu beschleunigen. Des Weiteren gewährleisten die Zugfedern eine definierte Nachgiebigkeit zur Nachführung während der Umformung des 2D-Zuschnittes zu einem 3D-Preform. Die notwendige minimale Anzahl und Position dieser Aufnahme- punkte wurde in empirischen Vorversuchen ermittelt.

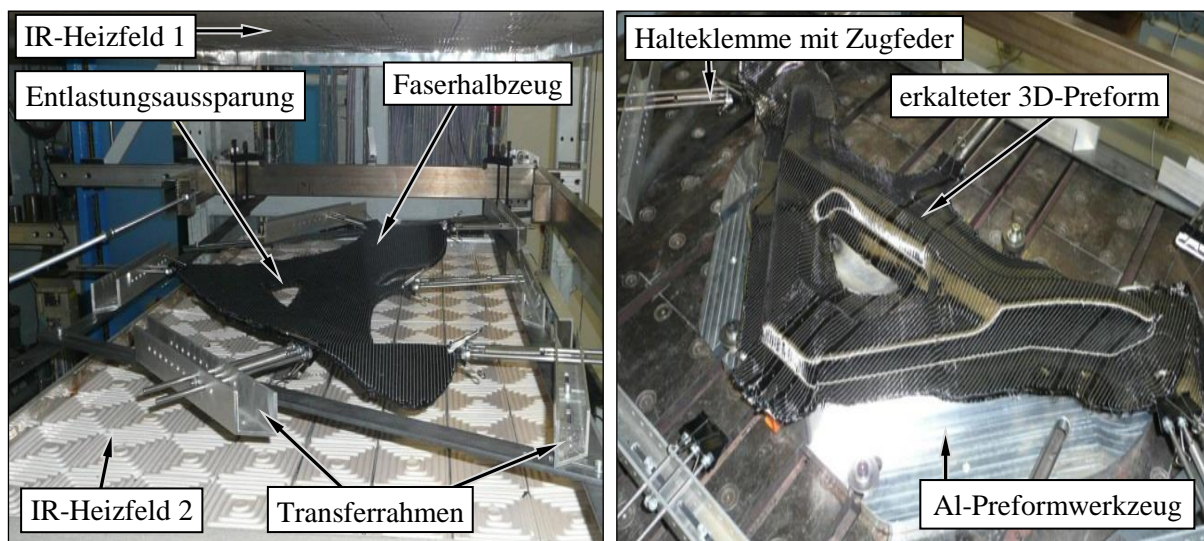


Abbildung 2.3-3: Faserzuschnitt im doppelseitigen IR-Heizfeld (links) und in 3D-Kontur umgeformter Faserzuschnitt (rechts)

Zum Prozessbeginn wird dieser bestückte Schweberahmen zunächst automatisiert mittels Lineareinheit zwischen einem doppelseitigen IR-Heizfeld transferiert und erwärmt dort die Kohlenstofffasern (hier drei Lagen mit einer Stärke von je 0,5 mm aus bidirektionalem Gelege 6 K 267 g/m<sup>2</sup> vgl. Datenblatt Anhang 13.3) und damit den dazwischen

liegenden Binder (hier: Spunfab PA 1541A). Nach Erreichen der notwendigen Erweichungstemperatur des Binders wird der Zuschnitt aus dem IR-Heizfeld und zwischen Ober- und Unterpresswerkzeug gefahren, positioniert und durch den Schließvorgang der Presse umgeformt. Durch die komplexe, vorliegende Geometrie des Preforms wurde das Umformwerkzeug mit einem ineinanderlaufenden Doppelpressstempel ausgeführt. Der mittels Druckfedern voreilende zweigeteilte Formstempel ermöglicht eine Vordrapierung des Zuschnittes in der zentral platzierten Vertiefung der Form. Mit fortschreitender Schließbewegung erfolgt nach Aufsetzen des ersten Stempels die Drapierung der Fasern nach außen. Der Zuschnitt ist mit einer Entlastungsaussparung versehen, um die Faserstresspannungen infolge von Materialmangel durch die Geometrieausformungen im Inneren der zu generierenden 3D-Preformkontur zu beheben (vgl. Abbildung 2.3-3 (links)). Das geschlossene Aluminiumformwerkzeug entzieht durch die guten Wärmeleiteigenschaften schnell die Wärme, sodass der Thermoplastbinder erstarrt und der erstellte Preform seine 3D-Form beibehält (vgl. Abbildung 2.3-3 (rechts)). Die Umformung dieses kalten CF-Zuschnittes (800 mm x 1400 mm x 3 mm,  $T < 22\text{ °C}$ ) mit Thermoplastbinder zu einem kalten 3D-Preform ist mit der gezeigten Anlage in 5 Minuten möglich und entspricht damit dem derzeitigen Stand der Technik [55]. Wird ein Preform aus mehreren Subpreforms erstellt, müssen dessen Ränder sehr genau gefertigt werden, wenn diese sich im Werkzeug in Form von Überlappungen abbilden (z. B. durch lokale Verstärkungslagen). Deshalb schließt sich in dem Fall dem Umformprozess des Subpreforms noch ein Konturbearbeitungsschritt an. Hierbei wird der Preform auf eine Beschnittvorrichtung abgelegt, in Sollposition fixiert und ein robotergeführtes Ultraschallmesser kürzt den Randbereich auf definierter Sollkontur ein [56]. Dieser Schritt läuft meist zeitparallel zum Umformungsprozess ab [51].

Die 3D-Geometriefixierung beim Preforming erfolgt üblicherweise über einen thermoplastischen Binder, der in Pulverform, als Nähgarn oder als Bindervlies auf und zwischen die Faserlagen eingebracht wird [57]. Neuerungen zeigen auch Verfahren, die eine Geometriefixierung der biegeschlaffen Faserhalbzeuge über Vernähen, Tackern, Sprühkleben oder Chemical-Stitching realisieren [30, 58, 59]. Bei den auf thermoplastischen Bindern basierenden Verfahren ist häufig ein Aufschmelzen durch Erwärmen des Faserhalbzeuges vorgesehen, das üblicherweise mittels Kontaktheizvorrichtungen (z. B. Heizplatten) oder Wärmestrahlung (z. B. Infrarotstrahler) durchgeführt wird. Zur Energiereduzierung bei der Preformgenerierung wurde 2012 ein Ultraschallverfahren entwickelt, mit dem die Erzeugung der Schmelzhitze gezielt durch Grenzflächenreibung erfolgt [57, 60]. Nachteilig sind hierbei die hohen Investitionen sowie der beträchtliche Zeitaufwand zur Fixierung von großflächigen Bauteilen.

Wenn der Faservorformling erstellt ist, hat dieser durch den Binder eine Geometriefestigkeit ähnlich die von Pappe erlangt und wird dann, vorzugsweise automatisiert, in die Kavität des Injektionswerkzeuges eingelegt. Eine mögliche automatisierte Variante aus eigenen Versuchen ist in Abbildung 2.3-4 (links) dargestellt.

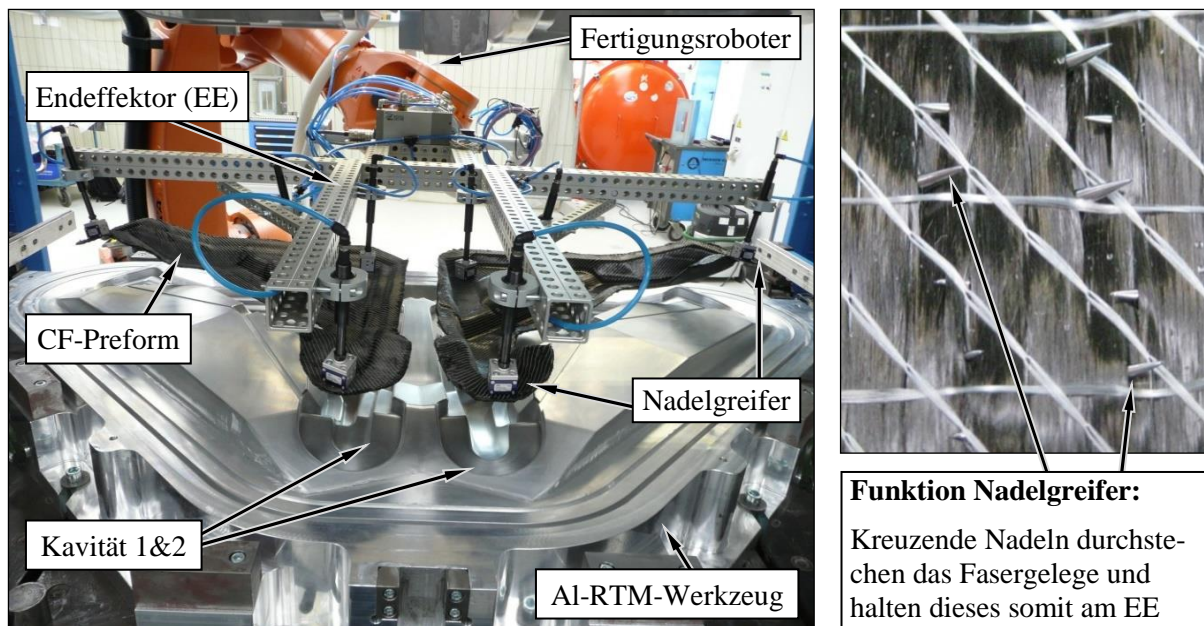


Abbildung 2.3-4: Fertigungsroboter belegt Doppelkavitätenwerkzeug zeitgleich mit zwei CF-Preforms (links) und Handhabung eines Faserhalbzeugs durch Schrägnadelgreifer (rechts)

In dem abgebildeten Versuchsendeffektor sind pneumatische Nadelgreifer am Greifrahmen appliziert, da diese leicht, energiesparend und rückstandslos das zu handhabende Kohlenstofffasergelege ergreifen, wie in Abbildung 2.3-4 (rechts) zu sehen ist. Sich kreuzende Nadeln, die zur prozesssicheren Handhabung in einem möglichst flachen Winkel zueinander stehen, stechen dabei durch das Halbzeug und halten dieses am Handhabungsendeffektor.

### 2.3.3.2 Harzinjektion

Wenn die Injektionsform mit dem Fasermaterial bestückt ist, engen zwei Werkzeughälften diesen in die gewünschte Endgeometrie ein, woraufhin beispielsweise beim HP-CRTM die Harzinjektion mit bis zu 100 bar und mehr innerhalb von wenigen Sekunden erfolgt. Die folgende Abbildung 2.3-5 (links) zeigt einen derzeit üblichen Aufbau eines selbst entwickelten eigenbeheizten RTM-Werkzeuges mit den für einen Serienprozess notwendigen Hauptbestandteilen sowie einem mehrkomponentigen Injektionskopf. Beispielhaft wird ein derartiger RTM-Mischkopf in Abbildung 2.3-5 (rechts) gezeigt.

Werkzeugspaltmaße sind sehr eng toleriert und die Formflächen möglichst ohne spitze Kanten ausgeführt, um den Reinigungsaufwand nach erfolgter Aushärtung zu reduzieren. Eine weitere Reinigungs- und Entformungsunterstützung ist die Verwendung eines dreikomponentigen Harzsystems. Dabei werden Harz, Härter und ein internes Trennmittel an der Austrittsöffnung des Mischkopfes mit hohem Druck vermengt und zwischen die zwei Formhälften in den Preform injiziert [61, 62].



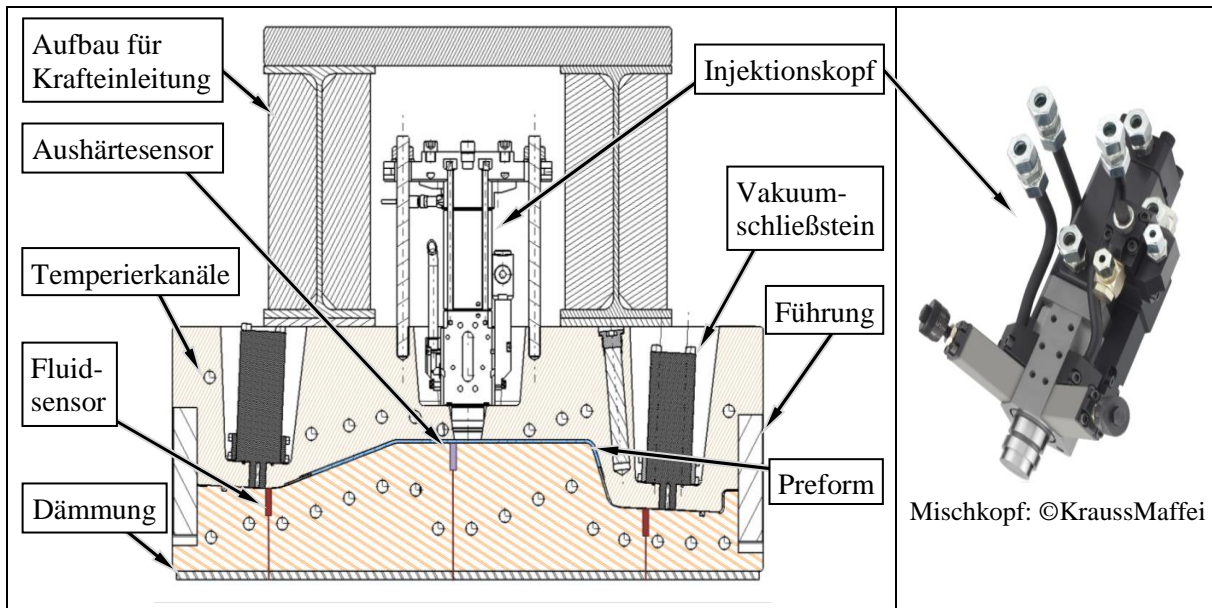


Abbildung 2.3-5: Schnittdarstellung eines RTM-Versuchswerkzeugs mit den Hauptkomponenten für eine automatisierte CFK-Serienfertigung (links) und Beispiel eines RTM-Mischkopfes (rechts)

In der Kavität wird vor der Injektion meistens ein Vakuum angelegt, um den Einschluss von Luftblasen in der Matrix zu verhindern. Dieses sogenannte „Vakuumziehen“ ist auch für das zu injizierende Harzmaterial ratsam. Dabei wird das Harz auf Injektionstemperatur erwärmt und unter ständigem Rühren mit Unterdruck beaufschlagt. Dieser sollte möglichst hoch oder zumindest höher sein, als der Unterdruck im RTM-Werkzeug, um anschließende Entgasungsvorgänge im Faserhalbzeug auszuschließen.

In vielen Werkzeugen sind integrierte Fluidsensoren in unmittelbarer Nähe der Vakuumschließsteine installiert, die den Harzflussfortschritt detektieren. Wenn das Harz kurz vor den Vakuumschließsteinen angekommen ist, werden diese geschlossen, um eine Verschmutzung zu verhindern. Zeitgleich wird mit dem Schließvorgang auch das Vakuumieren der Kavität gestoppt. Die Injektion kann beendet werden, sobald die vordefinierte Harzmenge oder ein bestimmter Forminnendruck erreicht ist. Durch sogenanntes Nachdrücken können eventuelle entstandene Lufteinschlüsse kleingedrückt und ein durch die Vernetzung entstehender Harzschwind minimiert werden.

Die hohen Injektionsdrücke sind gegenwärtig für kurze Zykluszeiten unumgänglich, da die Reaktionsparameter des Harzsystems auf eine kurze Aushärtung und damit auf schnell ansteigende Viskositätswerte ausgelegt sind [5, 61]. Die Injektionspunkte sind vorwiegend zentral platziert, um die erforderlichen Fließwege möglichst kurz zu halten. Problematisch bei diesen punkt- oder linienförmigen Angussstrategien ist die auf den Preform im Werkzeug einwirkende Harzdruckfront, die zu Verschiebungen der Verstärkungsfasern und somit zu späteren Qualitätseinbußen des Bauteils führen kann. Harzflusskanäle können die Harzverteilungszeit sowie die Fließwege und damit das Infiltrationsergebnis signifikant positiv beeinflussen [31, 52]. Nachteilig bei diesem Vorgehen

ist, dass diese nach dem Aushärtevorgang meistens entfernt werden müssen und zu Spannungen bzw. Verzug im Bauteil führen können.

Einen anderen Weg zur Reduktion des hohen Injektionsdruckes zeigt die Spaltinjektionsvariante [53]. Dabei wird das Werkzeug soweit zusammengefahren, dass die umlaufende Dichtung die Kavität abdichtet, aber die Position der Nullauflage noch nicht ganz erreicht ist (Erfahrungswerte: 0,5–0,7 mm Öffnungsmaß). Für die primär laterale Harzeinbringung steht dadurch mehr Freiraum zur Verfügung, sodass mit sehr niedrigem Forminnendruck schneller injiziert werden kann. Nach Erreichen der Sollharzmenge fährt die Presse das Werkzeug vollständig zu und vollzieht dadurch die Imprägnierung der Fasern in Dickenrichtung. Durch diese Technik verringert sich der Gegendruck bei der Injektion im Gegensatz zur herkömmlichen Harzeintragsvariante in eine vollständig geschlossene Form. Dadurch reduziert sich die notwendige Pressengröße und die dazugehörigen Formwerkzeuge können schwächer bzw. dünnwandiger ausgeführt werden [51].

Demzufolge fallen die notwendigen Investitionen niedriger aus und die laufenden Produktionskosten reduzieren sich infolge des niedrigeren Energieverbrauchs. Außerdem kann durch gezielte Steuerung der Biegelinie während der Schließbewegung der RTM-Presse – wie es beispielsweise durch Verwendung einer Mehrkolbendruckpresse (z. B. von der Firma Schuler) möglich ist – die Imprägnierungsrichtung beeinflusst werden. Zusätzlich zur Dickenrichtung kann die orthogonale Imprägnierung somit auch mit einer Vorzugsrichtung – linear von links nach rechts oder zirkular von innen nach außen treibend – positiv beeinflusst werden [51]. Die Fixierung der Verstärkungsfasern ist hierbei aufwendiger, da die dafür üblicherweise vorgesehenen Überpressungsflächen erst bei Erreichen der Endlage der Formflächen ihre Funktion vollständig erfüllen können und somit flexibel bzw. steuerbar in Werkzeugschließrichtung ausgeführt sein müssen. Aus diesem Grund werden die einzelnen Lagen oft vorab durch Vernähen [63], Tackern [59] oder durch die Verwendung von krampenartigen Einlegern untereinander fixiert [64].

Durch die Spaltinjektionsvariante entstehen zudem sehr kurze Fließwege ( $\Delta z$ ), welche sich positiv auf die Imprägnierzeit ( $t$ ) und damit auf die Gesamtzykluszeit auswirken. Ausgehend von einer eindimensionalen Imprägnierung lässt sich aus dem Gesetz von D'Arcy (Gleichung (2-1)) mit den Kennwerten der Viskosität ( $\eta$ ), der Druckdifferenz ( $\Delta p$ ) und der Permeabilität des trockenen Faserhalbzeuges in Dickenrichtung ( $K_z$ ) der Einfluss des Faktors auf die Zeit ablesen. Die nachstehend aufgeführte Gleichung (2-1) zeigt zudem den Einfluss des Injektionsdruckes als zweite zykluszeitbeeinflussbare Prozessgröße eines Harzinjektionsverfahrens bei vorgegebenen Halbzeug und festgelegtem Harzsystem.

$$t = \frac{\eta \cdot \Delta z^2}{K_z \cdot \Delta p} \quad (2-1)$$

Nach Erreichen des gewünschten Aushärtegrades, der beispielsweise mit einem Aushärtesensor nahe des Injektionspunktes ermittelt werden kann (vgl. Abbildung 2.3-5), wird das Werkzeug wieder geöffnet, das Bauteil ausgeworfen und ein neuer Faservorformling eingelegt. Der finale  $T_g$ -Wert des hergestellten Bauteils wird im Formwerkzeug oder außerhalb vom Werkzeug eingestellt. Die hierfür benötigte Nachvernetzungszeit kann in einem Ofen bei erhöhten Temperaturen gegenüber einer Nachvernetzung bei Raumtemperatur beschleunigt werden. Der notwendige Reinigungsaufwand des Formwerkzeuges wird durch Beimengen eines internen Trennmittels auf ein Minimum reduziert.

<b>Isothermer RTM-Prozess</b> (CFK-Bauteilgewicht ca. 8 kg, NCF, Faservolumengehalt 55 %)	<b>Zeit</b> [s]
Einlegen Preform in UWZ	120
Maschinenbewegung Presse UWZ einfahren und schließen	20
Vakuum ziehen	30
Injizieren	70
Aushärten	320
Maschinenbewegung Presse WZ öffnen	6
Reinigung WZOT	40
Maschinenbewegung Presse UWZ ausfahren	14
Bauteilentnahme UWZ	25
Reinigung UWZ	120

Tabelle 2.3-1: Herstellungszeiten für RTM-Bauteile

Die Tabelle 2.3-1 zeigt die Hauptprozessschritte für einen herkömmlichen, isothermen RTM-Fertigungsprozess mit einem 3-K-Harzsystem (Harz, Härter und internes Trennmittel). Die Zeiten wurden für ein ca. 8 kg schweres, integrales CFK-Bauteil aus NCF-Halbzeugen mit einem Faservolumengehalt von 55 % und einem  $T_g$  von 120 °C in einem eigenbeheizten Aluminiumwerkzeug mit einem Hochdruck-Harz-Injektionssystem und einer 1.000 t Presse in eigenen Versuchen erreicht und spiegeln die derzeit erreichbaren Zeiten für ein RTM-Serienbauteil wieder (vgl. [55, 65, 66, 67, 68]).

Der Einsatz einer Presse mit Werkzeugwechseltischen ist ratsam, um die einfache Zykluszeit von 12,75 min weiter auf 8,33 min zu reduzieren, [51]. Dabei wird eine RTM-Presse mit zwei Unterwerkzeugen und einem Oberwerkzeug ausgestattet. Der Vorteil dabei ist, dass während der blockierten Zeit des einen Unterwerkzeuges (UWZ1) in der Presse, zwecks vordefinierter Injektions- und Aushärtezeit, das andere (UWZ2) zur Seite ausgefahren ist, bereits gereinigt und mit einem neuen Preform belegt werden

kann. Die Pressenbelegungszeit wird dadurch optimiert, die notwendigen Investitionen minimiert und die Zykluszeit reduziert [51]. In der Abbildung 2.3-6 sind die prozentualen Anteile der Prozessschritte am Gesamtzyklus aus Tabelle 2.3-1, die sich aus den Zeitverbräuchen ergeben, dargestellt. Es wird ersichtlich, dass eine Teilung zu einer parallelen Abarbeitung der einzelnen Schritte sinnvoll ist.

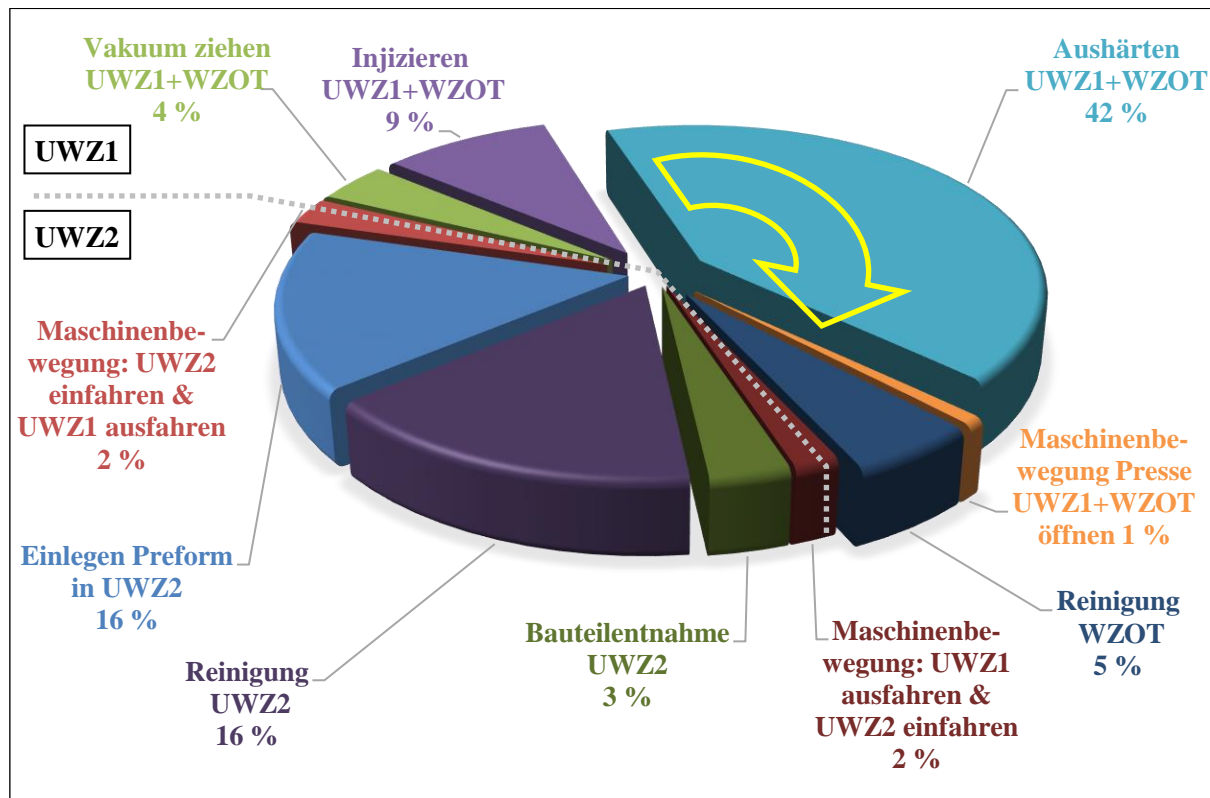


Abbildung 2.3-6: Anteile der Prozessschritte an der Gesamtzykluszeit im RTM-Prozess sowie Teilung zur Zykluszeitreduktion durch den Einsatz von Werkzeugwechseltischen

Wenn der Aushärtevorgang von UWZ1 abgeschlossen ist, wechselt dieses die Position mit UWZ2 und damit die folgenden Arbeitsschritte im Tortendiagramm. Bei der Erstellung von kleineren Bauteilen reicht eine einfache RTM-Pressen ohne ein automatisiertes Werkzeugwechselsystem aus, da hier die Injektions- und Aushärtezeiten wesentlich kürzer sind.

Ein kleineres erstelltes Demonstratorbauteil mit einem CFK-Bauteilgewicht von ca. 1 kg wurde als Referenzbauteil mit derzeit üblichen Prozessparametern gefertigt, um auch hierfür die in der Literatur aufgeführten Werte zu evaluieren. Als Halbzeug wurde ebenfalls NCF gewählt und ein Faservolumengehalt von 55 % und ein  $T_g$ -Wert von 120 °C definiert. Das Demonstratorbauteil wurde in einem eigenbeheizten Aluminiumwerkzeug hergestellt. In mehreren Versuchen konnte es in 5,67 min mit den in der Tabelle 2.3-2 aufgesplitteten Zwischenzeiten hergestellt werden. Die erzielten Zeiten decken sich mit den aus dem derzeitigen Stand der Technik bekannten, erreichbaren Zeiten (vgl. [55, 65, 66, 68]).



<b>Isothermer RTM-Prozess</b> (CFK-Bauteilgewicht ca. 1 kg, NCF, Faservolumengehalt 55 %)	<b>Zeit</b> [s]
Preform einlegen	10
Werkzeug schließen	8
Vakuum ziehen	15
Injizieren	23
Aushärten	180
Werkzeug öffnen	10
Entformen	14
Reinigung WZOT	20
Kavität säubern	60

Tabelle 2.3-2: Herstellungszeiten für kleinere RTM-Bauteile

Wegen der hohen Stückzahlen sind diese Aushärtewerkzeuge meist aus Metall gefertigt, was deren Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten aufgrund der resultierenden Masse verlangsamt und der Grund dafür ist, weshalb heutzutage hauptsächlich isotherme RTM-Prozesse gefahren werden.

### 2.3.3.3 Isotherme im Vergleich zur variothermen Prozessführung

Die notwendige Zykluszeit bei isothermen Injektions- und Aushärtungsprozessen ist für eine wirtschaftliche CFK-Bauteilfertigung oftmals noch zu hoch [11]. Damit diese auf ein Minimum beschränkt werden kann, wird oft ein Nachtempern der Bauteile außerhalb der Presse durchgeführt. Dabei wird ein teilausgehärtetes Bauteil bereits bei einem Aushärtungsgrad von ca. 95 % aus der Werkzeugform entnommen, um dessen Belegungszeit zu reduzieren [29]. In einem speziellen Abkühlwerkzeug wird das fast ausgehärtete Bauteil an definierten Positionen zur Geometrieerhaltung fixiert aufgenommen und zur Abkühlung abgelegt. Die vollständige Aushärtung erfolgt dann entweder über einen längeren Zeitraum bei Raumtemperatur oder in einem nachgeschalteten Ofengang. Dieser ist in vielen Bauteilherstellungsprozessen durch die meist notwendige Lackierung der Bauteile (z. B. kathodische Tauchlackierung (KTL) im Automobilbau) ohnehin diesem Prozess nachgeschaltet und kann demzufolge gleichzeitig auch zur Nachhärtung der Verbundwerkstoffe genutzt werden [51].

Ziel einer variothermen Prozessgestaltung ist es, bei tieferen Temperaturniveaus die Benetzung der Trockenfasern durch eine geringere Viskosität des Harzes zu begünstigen und nach dessen Vollendung die Aushärtung durch ein erhöhtes Temperaturniveau zu

beschleunigen [69]. Der Vorteil einer variothermen Prozessgestaltung betreffend der resultierenden Zykluszeit im Vergleich zur herkömmlichen isothermen ist in Abbildung 2.3-7 schematisch dargestellt.

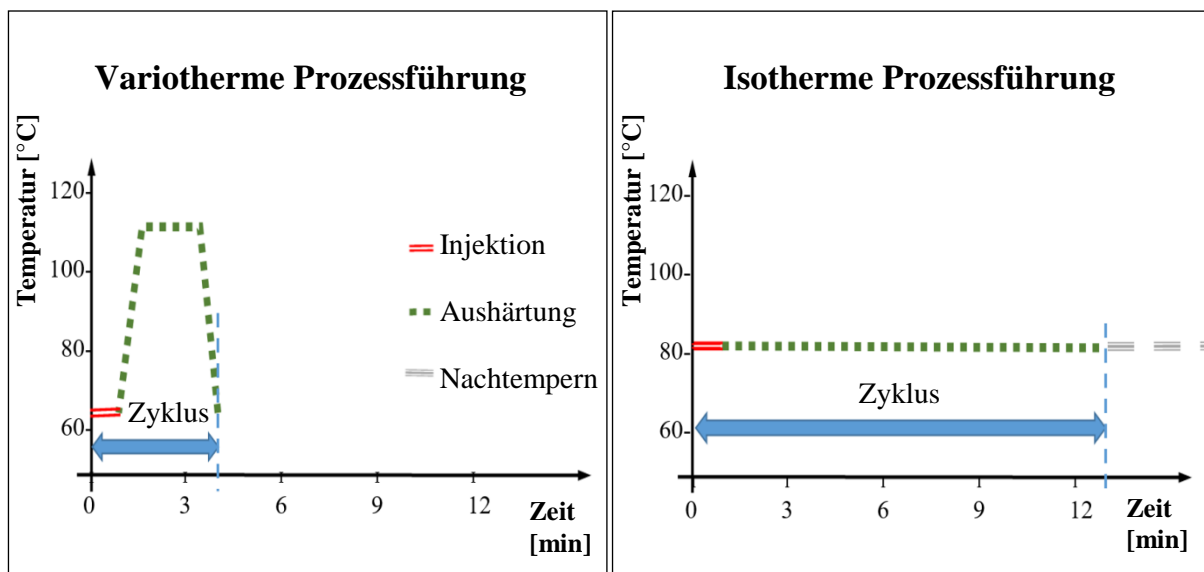


Abbildung 2.3-7: Zykluszeitreduktion durch variotherme Prozessführung [Quintessenz aus 66, 69, 70]

Eine prozessoptimierte Temperaturführung kann demzufolge mit einem abgestimmten Harzsystem signifikant die Durchlaufzeit eines Bauteils während der Injektion und Aushärtung gegenüber gleichartigen, aber mit isothermen Prozessparametern geführten reduzieren. Damit diese schnell wechselnden Prozesstemperaturen im Halbzeug erreicht werden können, existieren heutzutage Verfahren zur Erwärmung, die auf Heizquellen wie Fluidtemperierung, elektrische Heizelemente, Strahlung oder Induktion basieren [70]. Neben einer raschen Erwärmung müssen die Formhälften des Werkzeuges für den Beginn des nächstfolgenden Bauteilherstellungsprozesses auch wieder in kürzester Zeit abgekühlt werden. Diesbezüglich stehen für eine derartige Temperaturabsenkung die Kühlmedien Wasser, Öl, Wasserdampf, Luft oder Kohlendioxid zur Verfügung [71]. Bei einem auf Fluidtemperierung ausgelegten Werkzeugkonzept kann ein und dasselbe Kreislaufsystem für alternierendes Heizen und Kühlen verwendet werden, während für andere Erwärmungssysteme der Platz für beide konkurrierenden Systeme vorgehalten werden muss. Bei einer konturnahen Kühlung mit flüssigen Kühlmedien müssen diese vor der raschen Erwärmungsphase des Werkzeuges entleert bzw. ausgeblasen werden, da es ansonsten zum Verdampfen des Kühlmediums kommen könnte, was die Heizleistung aufgrund der hohen Verdampfungsenthalpie herabsetzen würde [72].

Problematisch sind die mit den heutigen Werkzeugkonzepten und Ansätzen zur Temperierung verbundenen größeren Energieaufwendungen, respektive den resultierenden höheren Kosten zur Erstellung eines Faserverbundbauteils mit einem zykluszeitgetrimm-

ten variothermen Prozess. Die notwendige Leistung, die für eine rasche Temperaturänderung der schweren metallischen Formwerkzeuge einer Großserienproduktion von CFK-Bauteilen notwendig ist, lässt sich grob aus folgender Gleichung (2-2) errechnen.

$$P = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (2-2)$$

Die Höhe der theoretisch notwendigen Leistung ( $P$ ) ergibt sich demnach aus der Masse des Formwerkzeugs ( $m$ ) verbunden mit dessen spezifischer Wärme ( $c$ ) sowie der Temperaturdifferenz ( $\Delta T$ ) und Zeit ( $\Delta t$ ). Da die Temperaturänderung und deren Zeit durch den variothermen Prozess vorgegeben sind, kann zur Senkung der notwendigen Leistung – neben der Reduktion auftretender Verlustleistungen – lediglich die zu temperierende Masse minimiert werden. RTM-Formwerkzeuge für CFK-Großserien sind aufgrund der notwendigen Standzeiten meistens aus Stahl gefertigt und wiegen mehrere Tonnen. RTM-Werkzeuge für den aktuellen BMWi3 belaufen sich beispielsweise auf ca. 85 t [73]. Eine Minimierung des zu temperierenden Gewichtes wäre demzufolge sinnvoll und eine direkte Einleitung der notwendigen Leistung in ein zur Umgebung abgeschirmten Bauteil optimal.

### 2.3.4 Verfahren zum Umformen von Organoblechen

Ein anderer Ansatz zur Erzeugung hochwertiger Kohlenstofffaserverbundbauteile in kurzen Zykluszeiten ist die Verwendung von thermoplastischen Prepreg als Halbzeug. Diese mit Thermoplast durchtränkten Prepregs werden üblicherweise auch als Organobleche bezeichnet [41, 52]. Diese Fasergelege oder Gewebe sind vollständig mit einer thermoplastischen Matrix imprägniert und konsolidiert. Große Vorteile ergeben sich durch die einfache Formgebung in kurzen Zykluszeiten, die Möglichkeit zum Fügen durch Schweißen, die Recyclbarkeit sowie das schadenstolerante Versagensverhalten [17].

Die Organoblechherstellung findet primär in heizbare Pressen oder Doppelbandpressen statt. Dabei werden zur Wirtschaftlichkeitserhöhung mehrere Lamine, durch Metallbleche getrennt voneinander, gleichzeitig verpresst. Die Fabrikation von Laminataufbauten mit größeren Wandstärken erfolgt mit bereits vollständig imprägnierten Faserhalbzeugen, die zu mehreren Lagen übereinandergestapelt, erwärmt und dann verpresst werden (sog. Bulk Konsolidation) [5]. Diese vorkonfektionierten und mit thermoplastischer Matrix vorimprägnierten Faserplatten werden als Zuschnitt in eine automatisierte Prozessstraße eingetaktet. Dort werden diese über die Erweichungstemperatur der Matrix erwärmt, dann in einer Umformpresse von einer 2D-Ausgangsplatte auf 3D-Bauteilkontur umgeformt und abgekühlt. Der typische Prozessablauf eines derartigen großserientauglichen Fertigungsprozesses ist exemplarisch in Abbildung 2.3-8 dargestellt.

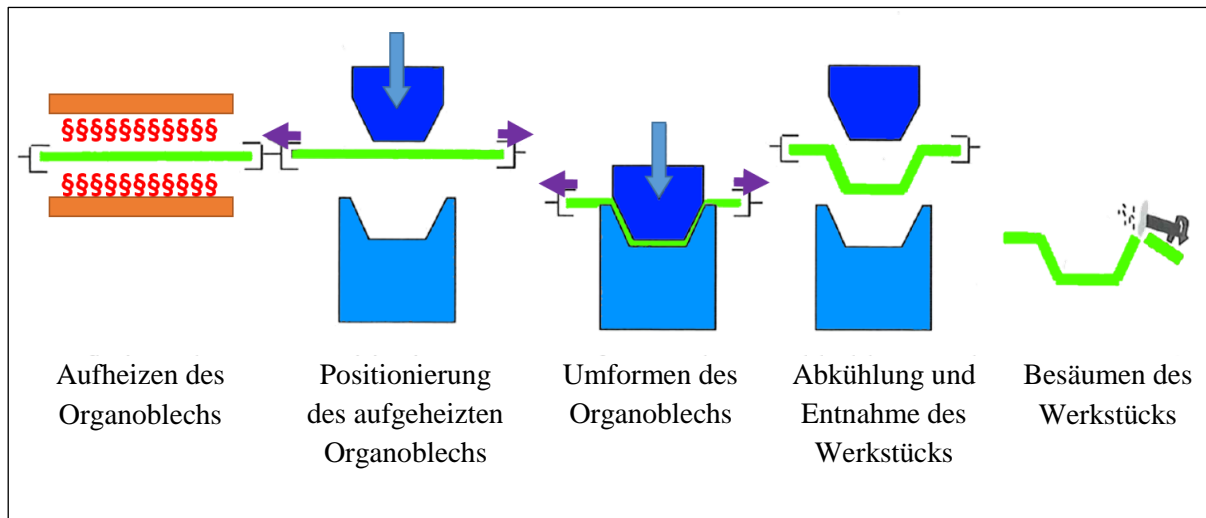


Abbildung 2.3-8: Prozessablauf beim Thermoformen von Organoblechen [5]

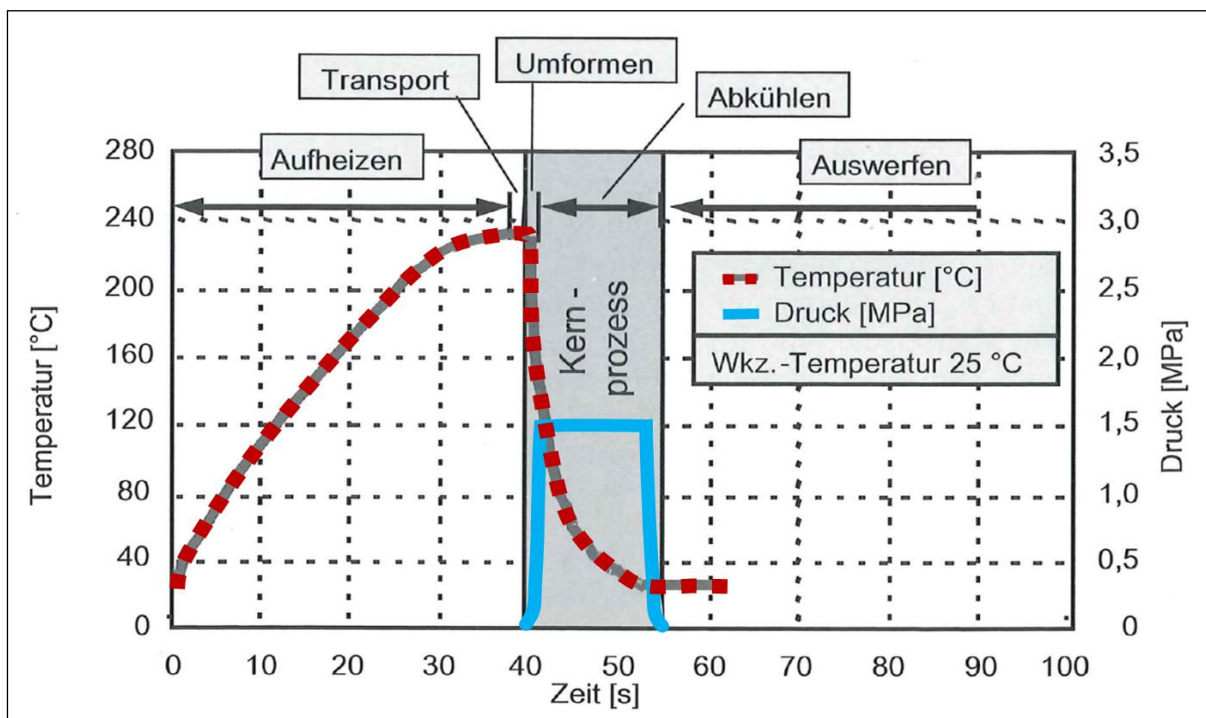


Abbildung 2.3-9: Taktzeiten beim Thermoformen von Organoblechen [5]

Abbildung 2.3-9 zeigt einen entsprechend typischer Temperatur- und Druck-Zeit-Verlauf. Da der Prozessschritt der Vereinigung von Faser und Matrix separiert vom Bauteilformgebungsprozess stattfindet, sind Zykluszeiten in der Teilefertigung von wenigen Minuten möglich [41]. Durch eine Entkopplung des Erwärmungsprozesses vom Umformvorgang, also durch einen zeitparallelen Prozessablauf, können Zeiten von 15 s erreicht werden [74].

Zur Erwärmung der Halbzeuge stehen Heizverfahren zur Verfügung, die sich in ihren primären Wärmetransportmechanismen, wie Wärmekonvektion (z. B. Umluftofen),

Wärmeleitung (z. B. Kontaktheizung) oder Wärmestrahlung (z. B. Infrarot), unterscheiden. Bei der Temperierungseinheit für die Organoblechumformung wird ein doppelseitiges Infrarot-Heizfeld bevorzugt eingesetzt, in welches die Thermoplastzuschnitte fixiert an Schweberahmen für eine definierte Zeit verweilen und beidseitig aufgeheizt werden [5]. Die raue Oberflächenstruktur sowie das gute Absorptionsspektrum der Halbzeuge begünstigen die Erwärmung mittels Infrarotstrahlern. Dabei dringt die Strahlung bis zu einige zehntel Millimeter beidseitig in das zu erwärmende thermoplastische Faserhalbzeug ein. Von dort aus wird die Energie per Wärmeleitung sukzessive ins Materialinnere weitergegeben [32]. Der große Vorteil gegenüber Kontaktheizelementen ist, dass hierbei Verklebungen zwischen Halbzeug und Heizelement ohne jegliche Trennmittel ausgeschlossen werden können.

## **2.4 Erwärmungsvarianten**

Die Zykluszeiten in der Kohlefaserverbundbauteilproduktion sind noch zu lang und die damit einhergehenden Kosten zu hoch. Damit diese gesenkt werden können, haben sich neben den gewöhnlichen Temperierungssystemen neue, effektivere herauskristallisiert; sie befinden sich derzeit zum Teil noch in der Erprobungs- bzw. Etablierungsphase.

### **2.4.1 Kontaktheizung**

Die bekannteste und renommierteste Variante zur Erwärmung eines Faserhalbzeuges ist die Verwendung beheizter Oberflächen. Dabei werden die Werkzeughälften über Heizplatten, Heizpatronen oder Heizkanäle elektrisch oder über ein temperiertes Fluid (z. B. Öl, Wasser) erwärmt [75]. Der Wärmetransport vom Werkzeug auf das Halbzeug erfolgt hierbei primär über Wärmeleitung. Wenn das Halbzeug leicht an die Heizfläche ange-drückt wird, reduziert sich der Übergangswiderstand und der Wärmetransport wird begünstigt. Problematisch bei einem Kontaktheizungskonzept können die sich direkt berührenden Flächen von Werkzeug und Halbzeug sein. So kann es bei der Verwendung von auf thermoplastischer Matrix basierenden Halbzeugen nahe der Erweichungstemperatur zu Anhaftungen dieser kommen, was durch eine erhöhte Anpresskraft noch verstärkt wird [74]. Abhilfe können Trennfolien schaffen, die jedoch den Übergangswiderstand zur Wärmeübertragung wieder erhöhen.

Für Großserien werden heutzutage oftmals metallische Werkzeuge eingesetzt. Grund hierfür sind ihre Standzeiten, ihre hohen Druckbelastungen sowie die vorgegebenen Qualitätsansprüche. Diese haben eine dementsprechend hohe Masse, infolgedessen eine große Wärmekapazität und sind daher sehr träge bzgl. einer Temperaturregelung (vgl.

Gleichung (2-2)). Eine Option, die Effizienz der auf Kontaktheizung basierenden Werkzeuge zu verbessern, ist die Reduktion der zu erwärmenden Masse sowie die Platzierung der Heiz- und Kühlelemente möglichst dicht an die Werkzeugoberfläche [76]. Eigenbeheizte CFK-Laminier- und Klebevorrichtungen, wie sie bereits für die Herstellung von Windkraftflügeln und für erste Bauteile in der Luftfahrtindustrie eingesetzt werden, bieten diesbezüglich einen ersten optimierten Ansatz. Es werden hierbei zum einen die Leitfähigkeiten von Kohlenstofffasern als Widerstandsheizung zur Erwärmung der Kunststoffform [77] als auch dessen tragende Eigenschaften in der Deckschicht genutzt. Lediglich eine ca. 0,4 mm dicke Formendeckschicht sowie eine zweite Lage aus Glasfasergewebe zur elektrischen Isolation von ca. 0,1 mm Stärke stehen bei diesem Werkzeugkonzept zwischen Hezelement und Halbzeug [78]. Als Alternative wurden dünnwandige, metallbeschichtete Schaumwerkzeuge mit integrierter Temperierungseinheit entwickelt, welche demgegenüber höhere Standzeiten erzielen. Ein entsprechendes Versuchswerkzeug wurde bereits erstellt und im Labormaßstab getestet. Es ist aus diversen Heizdrähten aufgebaut, die mittels Lichtbogendrahtspritzen mit Invar 36 in eine Schichtdicke von lediglich 3 mm vom Bauteil entfernt in dem Aushärtewerkzeug eingebettet wurden [79].

Der größte Nachteil eines auf Kontaktheizung aufgebauten Systems ist, dass der Wärmeeintrag von außen in das Faserhalbzeug eingeleitet wird und diese dann über Wärmeleitung ins Innere weitergetragen werden muss. Je nach Wärmeleiteigenschaften des Halbzeuges und dessen Wandstärke kann dies zu einer inhomogenen Erwärmung oder zu erhöhten Temperierungszeiten führen.

#### **2.4.2 Infrarotstrahler**

Kohlenstofffasern eignen sich wegen des hohen Absorptionsgrads sehr gut zur Erwärmung mittels Infrarotstrahlern. Diese erlauben eine relativ kompakte, berührungslose Wärmequelle und sind als Flächen-, Linien- oder Punktstrahler erhältlich. Für großflächige Halbzeuge sind oft mehrere IR-Strahler zu Heizfeldern nebeneinander arrangiert und können so individuell für ein homogenes Erwärmungsergebnis angesteuert werden [80].

Die auf das Halbzeug vom Strahler transferierte Energie wird durch elektromagnetische Schwingungen transportiert, sodass die vom Infrarotstrahler angestrahlte Fläche direkt erwärmt wird. Die zwischen Strahler und Halbzeug liegende Umgebungsluft erwärmt sich aufgrund der in der Luft enthaltenen Wassermoleküle nur sehr gering. Zur Erwärmung der Thermoplastverbundwerkstoffe werden diese vorzugsweise in einem Spannrahmen aufgenommen und durch ein doppelseitiges, meist horizontal angeordnetes IR-Strahlerfeld transportiert. Die Strahlstärke der Strahlquelle ist neben dessen Intensität vom Abstand und Abstrahlungsrichtung bzw. deren Winkel zur Flächennormalrichtung

des zu erwärmenden Körpers abhängig [81]. Aus diesem Grund sollten die Strahler immer möglichst dicht und orthogonal zur Halbzeugoberfläche ausgerichtet sein, um den Wirkungsgrad zu maximieren. Die folgende Abbildung 2.4-1 zeigt die Intensität der Wärmestrahlung in Abhängigkeit zum gewählten bzw. möglichen Abstand.

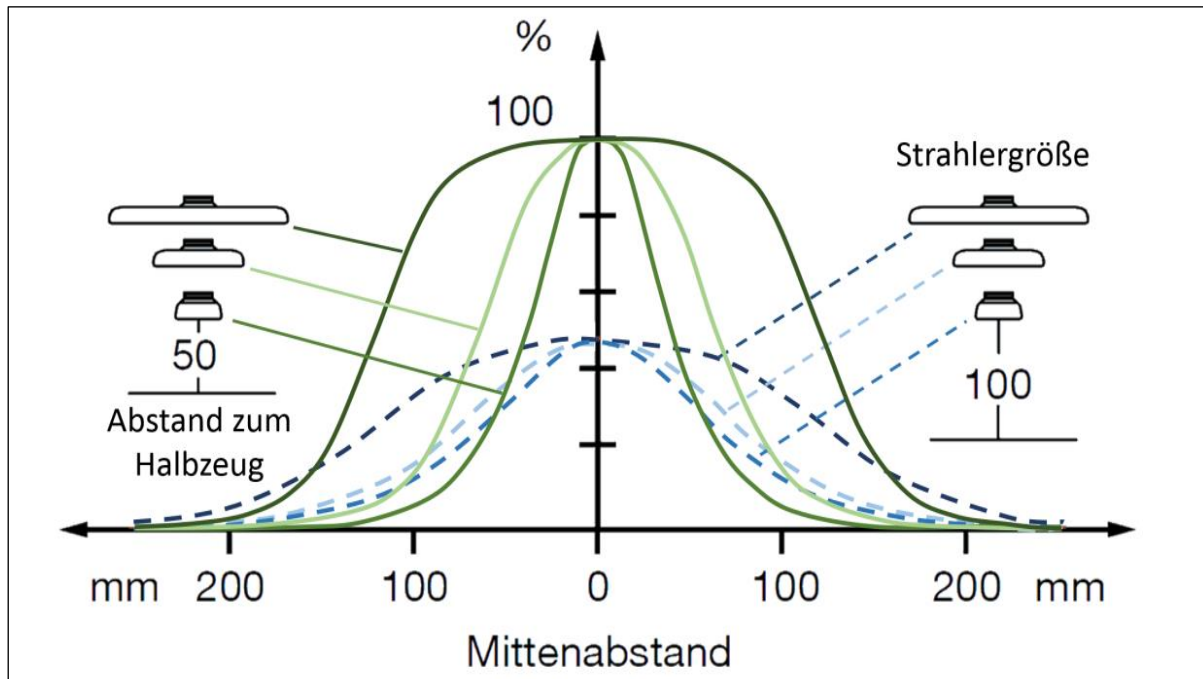


Abbildung 2.4-1: Wärmestrahlungsverteilung von verschiedenen großen IR-Strahlern [80]

Einem geringeren Abstand steht bei einer statischen IR-Bestrahlung eine gleichmäßige Halbzeugerwärmung entgegen, da die IR-Strahlen auf ihrem Weg zum Halbzeug eine kleinere Wegstrecke zurücklegen und damit einen schmaleren Streukegel erzeugen [80].

In einem eigenen kleinen Versuchsstand wurden PPS- und PEEK-Organobleche in einem doppelseitigen IR-Heizfeld mit beidseitig je drei dicht nebeneinander fixierten IR-Strahlern (vom Typ Elstein SHTS/2) mit einem gegenüberliegenden Abstand von 25 mm zueinander aufgeheizt. Dies führte aufgrund der inhomogenen Wärmestrahlungsverteilung in Breitenrichtung zu einer ungleichmäßigen Aufschmelzung des Organoblechs, wie in Abbildung 2.4-2 zu erkennen ist.



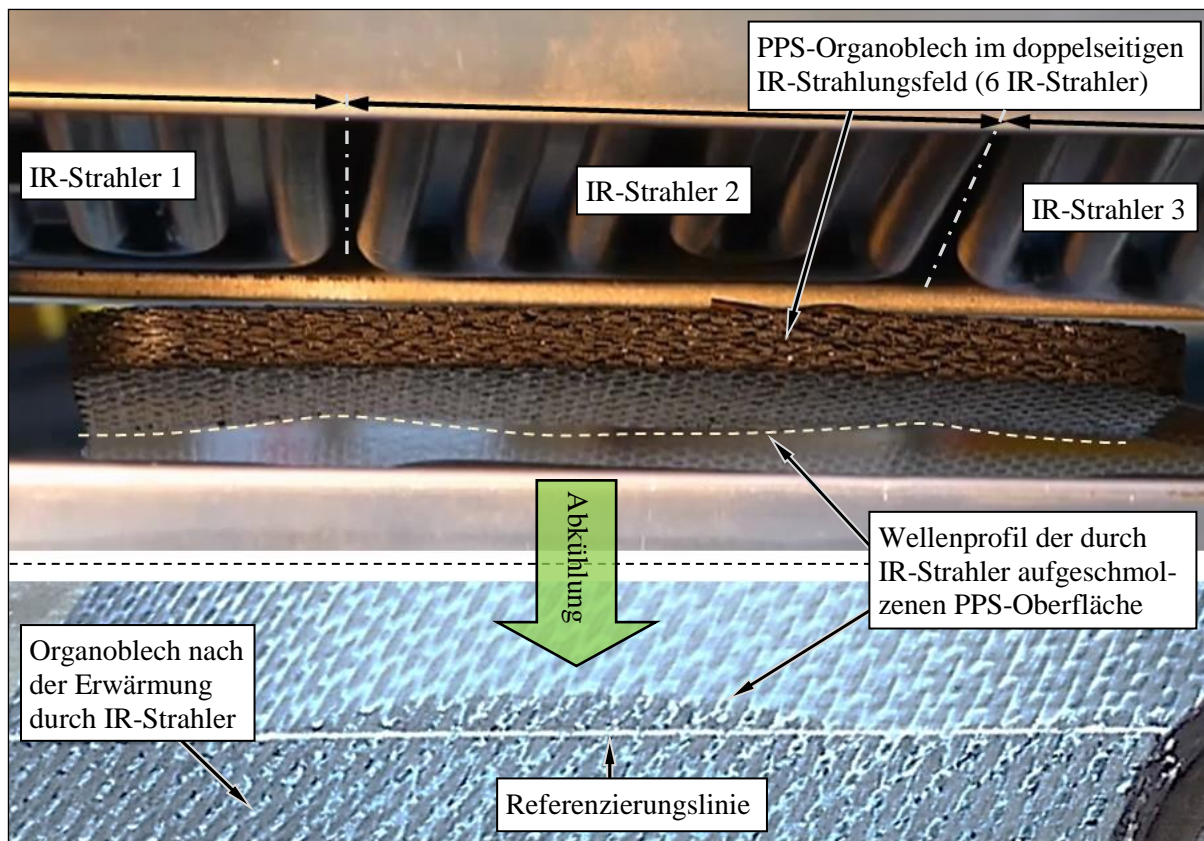


Abbildung 2.4-2: Ungleichmäßige Erwärmung des Organoblechs durch das IR-Strahlerfeld

Eine dynamische lineare Transportbewegung des zu temperierenden Halbzeuges durch ein entsprechend angeordnetes IR-Heizfeld würde demgegenüber wieder zu einer gleichmäßigeren Aufschmelzung des Halbzeuges führen. Eine homogene Erwärmung eines aus einer Vielzahl von Lagen aufgebauten Laminates könnte problematisch werden, da die IR-Strahlen nur wenige zehntel Millimeter in das Halbzeug eindringen können [74]. Ab dort findet der Wärmetransport zu den innen liegenden Schichten über Wärmeleitung statt. Infolgedessen führt eine Leistungserhöhung der IR-Strahler – zwecks Reduktion der für die Erweichungstemperatur eines betreffenden Organoblechs notwendigen Zeit – zu erhöhten Temperaturdifferenzen zwischen den außen und innen liegenden Bereichen des Halbzeuges. Dies kann zu Schädigungen oder chemischen Veränderungen der äußeren Matrixbereiche führen. Zudem ist bei dieser Erwärmungsvariante von Nachteil, dass der Platz am betreffenden Formwerkzeug für IR-Strahler meist nicht vorhanden und somit eine separate Aufheizkammer notwendig ist. Diese Tatsache induziert neben einen erhöhten Platzbedarf zusätzliche Transportwege, wodurch die Transportzeiten ansteigen. Außerdem muss das Halbzeug über der notwendigen Umformtemperatur erwärmt werden, um die Abkühlvorgänge während dieser zusätzlichen Transportbewegung von der Aufheizkammer zur Umformstation zu kompensieren.



### 2.4.3 Mikrowelle

Einen anderen Ansatz zur Reduzierung des Abfließens von Energie in die Umgebung und in das Formwerkzeug wird durch die Aufwendung von Mikrowelleneinwirkungen verfolgt. Hiermit ist es prinzipiell möglich, eine selektive, volumetrische Erwärmung zu erzeugen und damit eine erheblich bessere Energieeffizienz zu erreichen, da mehr aufgebrauchte Energie direkt in die Vernetzungsreaktion einfließt. Mit dem Ziel „Mit kalten Öfen zu energieeffizienten Produktionstechnologien der Zukunft“ [82] wurde die Entwicklung einer Mikrowellenanlage realisiert. Bis dato waren nur elektrisch nicht leitende Materialien für eine Erwärmung dieser Art prädestiniert, wie beispielsweise eine Harzerwärmungsanlage, womit eine Prozesszeitersparnis von 90 % erreicht wurde [83, 84].

Erste Versuche, die Mikrowellentechnologie für die Preformherstellung von Kohlenstofffaserbauteilen zu nutzen, erforderten ein Werkzeug, das eine Kombination von mikrowellentransparenten (z. B. Poly-Ether-Ether-Keton, Polypropylen) und mikrowellendurchlässigen Materialien (z. B. Aluminium) aufwies. Für ein dickwandiges Testbauteil konnte damit eine Zeitersparnis von 50 % erreicht werden [84]. Die Herausforderung bestand früher darin, die gleichmäßige Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen ohne die Verursachung von lokalen Temperaturerhöhungen über Mikrowelleneinwirkung zu erzeugen. Inzwischen ist die Verteilung des elektromagnetischen Feldes im Resonator und damit die Anregung der Dipole durch das anregende elektromagnetische Feld sehr stark homogenisiert worden. Infolgedessen ist es heutzutage bereits möglich, hochqualitative CFK-Luftfahrtstrukturen mit herkömmlichen Produktionsmitteln (z. B. metallische Werkzeuge) in einer Mikrowellenanlage herzustellen. In Abbildung 2.4-3 (links) ist der Resonatorquerschnitt mit zwei Einkoppelstrukturpaaren eines Mikrowellenofens mit einem hexagonalen Resonator zur Erzeugung einer hohen Feldhomogenität schematisch dargestellt.

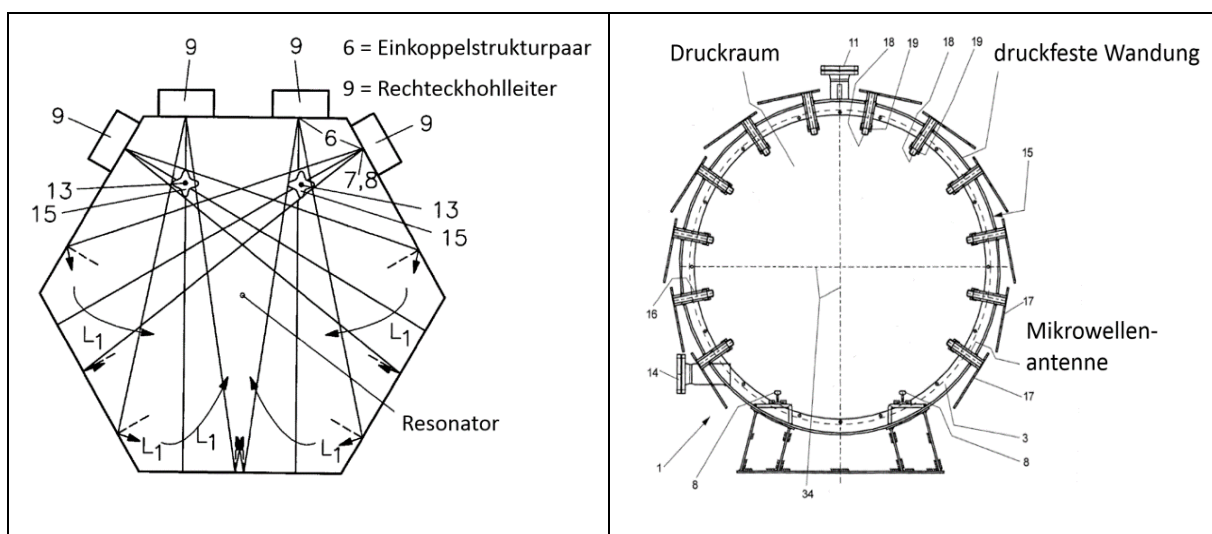


Abbildung 2.4-3: Prinzip Mikrowellenofen (links) [85] und Prinzip Mikrowellenautoklav (rechts) [86]

In Abbildung 2.4-3 (rechts) ist zudem eine Zeichnung eines Querschnittes durch einen Mikrowellenautoklav mit den wesentlichen Komponenten skizziert. Die erste flexible Forschungsanlage dieser Art mit 96 Feldquellen, welche sich bei einem nutzbaren Durchmesser von 4 m und entlang einer Länge von 1,6 m über der Oberfläche verteilen, steht beim Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig.

#### 2.4.4 Induktion

Kohlenstofffasern sind elektrisch leitend und lassen sich deshalb auch induktiv erwärmen. Für eine derartige Induktionserwärmung wird ein Induktor mit Wechselstrom beaufschlagt, der dadurch ein elektromagnetisches Wechselfeld in seiner Umgebung aufbaut. Wird ein elektrisch leitfähiger, nicht magnetischer Gegenstand in dessen Nähe gebracht, so werden Wirbelströme induziert, die eine Erwärmung des Werkstoffes durch Widerstandsverluste bewirken [87]. Materialien wie Kupfer oder Aluminium eignen sich weniger für eine Erwärmung durch Induktion, da deren elektrischer Widerstand zu gering ist. Ein ferromagnetisches Material ist dabei günstig, weil es die eigentlich symmetrische Feldverteilung nach oben verzerrt [88] und so die eingebrachte Energie durch Hysterese- oder Ummagnetisierungsverluste verstärkt in thermische Energie wandelt [89].

Kohlenstofffasern erwärmen sich bei Induktion durch Joulesche Verluste innerhalb der Fasern durch deren elektrischen Leitungswiderstand, deren Widerstandsverluste an den Kontaktpunkten untereinander sowie durch dielektrische Hysterese in dem umgebenden Matrixwerkstoff [90, 91]. Vorzüge, die – neben der Möglichkeit zur raschen Temperaturerhöhung – für eine induktive Erwärmung sprechen, sind die berührungslose, energetisch effektive und selektive sowie eine volumetrische Erhitzung bei Kohlenstofffaserlaminaten [90]. Da die Erwärmung von innen heraus erfolgt, tritt hierbei kein Temperaturgradient über den Laminatquerschnitt des Bauteils auf, wie bei den industriell verwendeten Erwärmungsmechanismen mittels Konvektion oder Infrarotstrahlung. Dickwandige Bauteile können mit einem Induktor, betreffend dem örtlichen Aushärtegrad, in Dickenrichtung gleichmäßiger erwärmt werden, sodass aufwendige Zwischenhärtungsschritte überflüssig sind.

Zum Fügen von Kohlenstofffaserverbundbauteilen bietet das Induktionsschweißen aufgrund der einfachen und kleinen Bauweise ein gut automatisierbares, wirtschaftliches Verfahren [87]. Erste Versuche, Formwerkzeuge per Induktion schneller zu erwärmen, haben bereits stattgefunden und ermöglichen Aufheizraten von über 150 K/min [70]. Neben dem beschleunigten Aufheizen des Preforms und der damit einhergehenden reduzierten Zeit bis zum Injektionsbeginn können auch danach schnellere Aufheizrampen

gefahren und dadurch variotherme Prozesse effektiver durchfahren werden. Eine praktikable Variante, um ein Presswerkzeug mittels Induktion zu temperieren, basiert auf externe Induktoren. Für die entsprechende Stromleitung zur induktiven Erwärmung ist ein Käfig um die Form herum installiert (sogenanntes Cage System). Die Oberflächen der vom Magnetfeld umgebenden Kavität aus ferromagnetischer Legierung werden dabei durch den sogenannten Skin-Effekt erwärmt. Die Ausnutzung der Curie-Temperatur verschiedener Legierungen kann dabei zur Steuerung der Prozesstemperatur genutzt werden [70].

Bei einem anderen induktiven Werkzeugkonzept werden die Induktoren in Temperierkanäle in die Form integriert (3iTech). Dabei beeinflusst das Magnetfeld die umgebende Kanalwandung und damit das Temperierfluid. Es entstehen somit keine Ströme an der Kavitätsoberfläche und die Werkzeughälften können unabhängig voneinander temperiert werden [92].

#### 2.4.5 Direktbestromung

Eine sehr energieeffiziente Methode, Kohlenstofffaserhalbzeuge zu erwärmen, bietet die Nutzung des Prinzips der Jouleschen Wärme durch direkte Stromeinleitung in die Fasern. Da die Kohlenstofffasern elektrisch leitend sind, wird die Wärme direkt in dem als Widerstandsheizung fungierenden Halbzeug generiert, wodurch anfallende Wärmetransportverluste weitestgehend eliminiert werden können.

Seit Jahrzehnten wird das Widerstandsheizen in Wärmedecken, Sitzheizungen, Heckscheibenheizungen sowie Glühdrähten eingesetzt. Als industrielle Anwendungen zur Aushärtung von Verbundwerkstoffen sind direkt kontaktierte Kohlenstofffasern als Widerstandsheizelement in Kontaktheizwerkzeugen bereits geläufig (vgl. Kapitel 2.4.1 *Kontaktheizung*). Eine publizierte Direktbestromungsvariante von Organoblechen prognostiziert einen Wirkungsgrad von bis zu 0,9 bei zugleich geringeren Aufheizraten [18]. Gestützt wird diese These durch einen ersten Versuchsstand, bei dem der elektrische Strom mittels zwei Einspannelektroden durch ein Organoblech geleitet und dessen innere Aufheizung bereits rudimentär untersucht wurde. Die registrierte Wärmeentwicklung während einer Bestromungsdauer von zehn Sekunden wurde dabei als relativ homogen bewertet [18].

Neben dieser Herstellungsvariante, Bauteile mit thermoplastischen Matrixsystemen durch Joulesche Wärme zu formen, hat sich ein IMI-Verfahren (In Mould Impregnation) entwickelt [17]. Bei diesem Fertigungsverfahren wird das Faserhalbzeug zwischen zwei Werkzeugformhälften positioniert und drapiert. Die elektrische Kontaktierung der Fasern erfolgt im Übermaßbereich des Bauteils durch Schließung der Werkzeughälften (Abbildung 2.4-4, Pos. 2). Durch Widerstandsheizen wird das Halbzeug auf die erforderliche Temperatur aufgeheizt und kann dann mit der plastifizierten Kunststoffschmelze mittels Prägehub in Dickenrichtung penetriert werden (Abbildung 2.4-4,

Pos. 3). Ist die Konsolidierungsphase abgeschlossen, wird die Stromquelle abgesperrt und nach der Abkühlphase kann das ausgehärtete Bauteil entnommen werden.

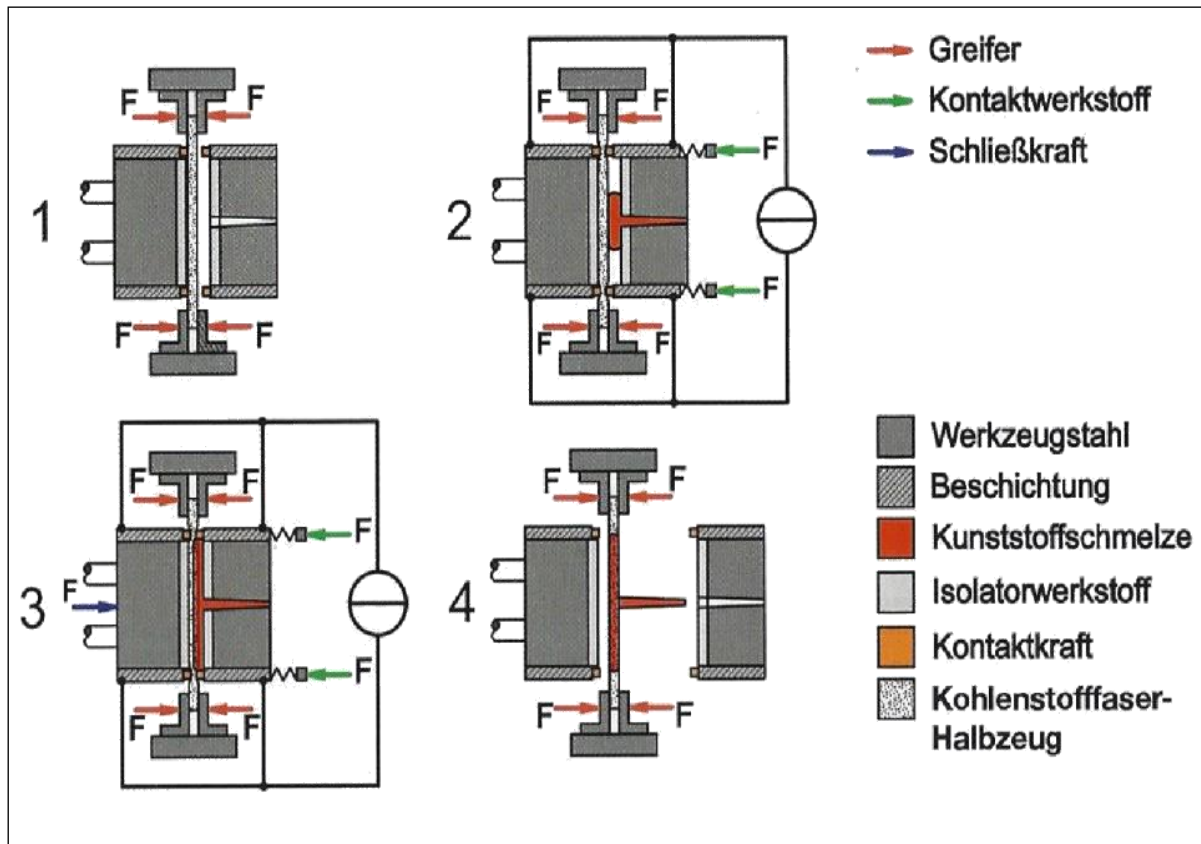


Abbildung 2.4-4: Prozessablauf des IMI-Verfahrens [17]

Neben der Imprägnierung kann dieser Aufbau somit auch zum direkten Hinterspritzen des Bauteils genutzt werden. Dabei werden beispielsweise Verstärkungsrippen oder andere Integrations- und Funktionselemente aus einem glasfaserverstärkten Kunststoff angespritzt, um zusätzliche Funktionen in das Hybridbauteil zu integrieren [61, 93].

### 3 Aufgabenstellung

Für die Herstellung von Kohlefaserverbundbauteilen werden zurzeit noch sehr hohe Energiemengen aufgebracht, die sich mit Blick auf die energetische Gesamtbilanzierung des entsprechenden Produktes negativ auswirken. Auch steht dies bei der Produktion von Leichtbauprodukten sehr konträr zum eigentlichen Sinn der Energieeinsparung. Zudem sind die heutigen erreichbaren Zykluszeiten für eine ökonomische Serienproduktion von CFK-Bauteilen noch nicht kurz genug.

Der zur Produktion von Leichtbauprodukten mit Kohlenstofffaserhalbzeugen notwendige Energie- und Zeitaufwand soll durch ein innovatives Fertigungsverfahren wesentlich reduziert werden. Die Eignung des Direktbestromungsprinzips zur Erwärmung der Halbzeuge im Herstellungsprozess für Faserverbundbauteile soll konzeptionell erarbeitet und anhand repräsentativer Versuchsstände validiert werden. Ein wesentliches Kriterium zur Abstimmung und Auslegung des Konzeptes ist der Bezug zu der damit erreichbaren Bauteilqualität. Die betreffenden Faserhalbzeuge sollen durch das direkte Erwärmungsprinzip keine Beschädigungen oder bleibende Verformungen vor, während und nach dem Greif- bzw. Kontaktierungsprozess erfahren. Ferner ist von der Verwendung zusätzlicher Hilfsstoffe abzusehen, die eine Kontaminierung des betreffenden Halbzeuges oder steigende Fertigungskosten induzieren. Die resultierende Gleichmäßigkeit der erzeugten Erwärmung des Faserhalbzeugs in Flächen- und Dickenrichtung in Abhängigkeit zur Prozessoptimierung ist zudem ein Maß für die Güte des Verfahrens und soll explizit im Detail untersucht werden.

Die Widerstandserwärmung soll an trockenen Kohlenstofffaserhalbzeugen sowie an Halbzeugen mit thermoplastischer Matrix erprobt werden, um deren jeweilige Reaktion auf das Erwärmungsergebnis zu analysieren. Dabei werden Kohlenstofffasergelege und -gewebe für diese Untersuchungen herangezogen. Des Weiteren soll eine technische Modellbildung durchgeführt werden, um eine entsprechende Formel zu generieren, welche die Einflüsse von Größe, Halbzeugart und eingeleiteten Stromstärke zur sich einstellenden Temperaturerhöhung in Abhängigkeit von der Zeit beinhaltet. Das verfolgte Ziel dabei ist die Möglichkeit zur Vorabdimensionierung einer auf direkter Widerstandserwärmung von Halbzeugen basierenden Fertigungsanlage.

Das Augenmerk der betrachteten Grundverfahren zur Generierung von Leichtbauartikeln liegt dabei auf die Erzeugung der notwendigen Wärme für den Umformprozess eines zweidimensionalen Faserzuschnittes zu einem dreidimensionalen Faserpreform.

Des Weiteren soll diese Art zur erforderlichen Temperaturerzeugung für den Formgebungsprozess von thermoplastischen Kohlenstofffaserplatten betrachtet werden. Außerdem ist die Erwärmung für das Harzinjektionsverfahren von Faserhalbzeugen – in Form des großserientauglichen RTM-Verfahrens – Gegenstand dieser wissenschaftlichen Arbeit. Neben der Darstellung der praktischen Machbarkeit zur Integration des Direktbestromungsprinzips in diese Grundverfahren sollen dessen Vorzüge, Grenzen, Kennwerte, verfahrenstypische Eigenarten sowie erste Parameter ermittelt werden, die für die zukünftige Auslegung und Konstruktion dieser neuartigen Fertigungsanlagen von existenzieller Bedeutung sind. Bei der Potenzialbewertung zur optimierten Einleitung der notwendigen Energie in das zu erwärmende Bauteil steht der jeweilige Energie- und Zykluszeitbedarf einer Direktbestromung gegenüber bestehender Verfahren im Vordergrund.

## 4 Theoretische Grundlagen

Bei den industriell hergestellten Verstärkungsfasern aus Kohlenstoff werden kleinstmögliche Filamentdurchmesser und Endloslängen präferiert, um den resultierenden Größeneffekt zu maximieren. Eine Kohlenstofffaser hat üblicherweise einen Durchmesser von 5-8  $\mu\text{m}$  und erreicht damit eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit, allerdings nur eine geringe Bruchdehnung. Mehrere dieser Filamente werden zu Rovings zusammengefasst und auf eine Spule aufgewickelt, die in Webmaschinen zu diversen Halbzeugen weiterverarbeitet oder direkt als orientierte Verstärkungsfasern abgelegt werden. Die Anzahl der gebündelten Filamente liegt bei 1.000 Filamenten für einen 1K-Roving und geht hoch bis auf 48.000 (48 K) Einzelfasern für einen Heavy Tow [94].

### 4.1 Aufbau von Kohlenstofffasern

Kohlenstoff ist ein chemisches Element, das dem Elementsymbol C (von lateinisch carbo = Kohle) zugeordnet wurde und die Ordnungszahl sechs besitzt. Im Periodensystem der Elemente ist es folglich in der vierten Hauptgruppe und zweiten Periode wiederzufinden und hat die Orbitale  $1s^2 2s^2 2p^2$ . Die Graphit- und Graphenstruktur besitzt eine  $sp^2$ -Hybridisierung, wohingegen ein Diamant eine Gitterstruktur aus vier  $sp^3$ -Hybridorbitalen aufweist. Die Anordnung dieser  $sp^3$ -Hybridorbitale ergibt eine tetraedrische Form aufgrund des Bestrebens, den größtmöglichen Abstand zueinander einnehmen zu wollen. Mehrere sich überlappende  $sp^3$ -Orbitale von Kohlenstoffatomen bilden dann hochfeste kovalente Bindungen untereinander und damit das Grundgerüst des Diamantgitters. Diese dreidimensional gebundenen Kohlenstoffatome verleihen dem Diamanten die Eigenschaft transparent und ein Isolator zu sein.

Kohlenstofffasern bestehen aus einer graphitartigen Kohlenstoffstruktur, in der die C-Atome in einem sechseckigen Gitter angeordnet sind. Durch die  $sp^2$ -Hybridisierung der Atome können kovalente Bindungen nur innerhalb der Basalebenen ausgebildet werden. Die Ebenen zueinander werden durch die freien pi-Elektronen in den sich überlappenden p-Orbitalen durch Van-der-Waals-Kräfte verbunden. Diese pi-Bindungsart ist wesentlich schwächer als die sigma-Bindungen bei den  $sp^2$ - und  $sp^3$ -Hybridorbitalen und verantwortlich für die tiefschwarze Farbe sowie die hohe elektrische Leitfähigkeit entlang der Basalebenen.

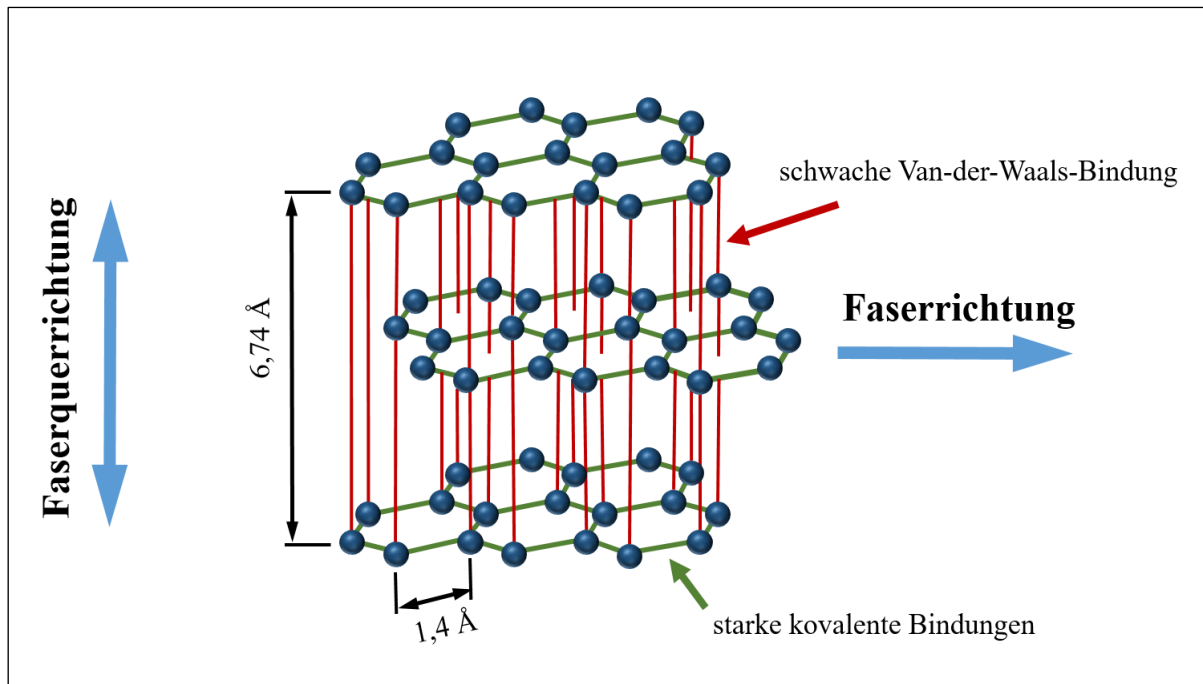


Abbildung 4.1-1: Gitteraufbau des Kohlenstoffeinkristalls [12]

Aus der hexagonal aufgebauten Schichtstruktur, die schematisch in Abbildung 4.1-1 dargestellt ist, lässt sich das anisotrope Verhalten von Graphit erklären. Die guten thermischen und elektrischen Leitfähigkeiten konzentrieren sich auf den Bereich entlang der kovalenten Kristallebenen. Von Kristallebene zu Kristallebene funktioniert diese Leitfähigkeit aufgrund der schwachen Van-der-Waals-Bindungen weitaus schlechter.

Mit dem Wissen über diese Bindungskonstellationen lassen sich die mechanischen Eigenschaften und deren kristallografischen Richtungsabhängigkeiten erklären. Die theoretische elastische Konstante innerhalb der Schichten beträgt 1.060 GPa, während senkrecht zu den Schichten ein Wert von 36,5 GPa und bei Scherung in Richtung der Schichten lediglich ein Wert von 4,5 GPa erreicht wird (vgl. [94]). Daraus geht hervor, dass Verstärkungsfasern Fehlstellen zur Erhöhung der Festigkeit haben sollten, damit die einzelnen Basalebenen nicht unter Belastung gegeneinander abgleiten. Gleiches gilt für die theoretische Wärmeleitfähigkeit quer zur Faserrichtung, die aufgrund der gerichteten Graphitstruktur theoretisch null sein müsste, aber praktisch aufgrund von Fehlstellen nicht ist.

Ähnlich lässt sich aus der Faserstruktur die anisotrope des thermischen Ausdehnungskoeffizienten erklären. Die Faser hat in Längsrichtung einen negativen Koeffizienten und verkürzt sich bei Erwärmung, während sie synchron in Dickenrichtung an Umfang zunimmt. Dieses Verhalten lässt sich mit der gesteigerten Energiezufuhr an die primär in Faserachse ausgerichteten  $sp^2$ -Hybridorbitalen erklären. Die Differenz des richtungsabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist bei High-Tenacity(HT)-Fasern geringer aufgrund der niedrigeren Ordnungszahl bzgl. der Graphitebenen als bei High-



Modulus(HM)-Fasern. Längs zur Faserachse beträgt der thermische Ausdehnungskoeffizient bei einer HT-Faser (PAN-Basis) ca.  $-0,455 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  gegenüber einer HM-Faser (PAN-Basis) ca.  $-1,08 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  und quer zur Achse beträgt der Wärmeausdehnungskoeffizient einer HT-Faser ca.  $12,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  gegenüber einer HM-Faser ca.  $31 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  [29].

## 4.2 Herstellung von Kohlenstofffasern

Für die Herstellung von Kohlenstofffasern werden als Ausgangswerkstoff hauptsächlich Cellulose, Polyacrylnitrilfasern (PAN) und Mesophasenpech (MPP) verwendet [12]. Wichtig für die Auswahl eines geeigneten Rohstoffes sind der hohe Kohlenstoffanteil in der Molekülstruktur sowie die geforderte Eigenschaft des Precursors, während der Herstellung den Fadenzustand nicht zu verlieren. Wirtschaftliche Aspekte und die höheren Festigkeitswerte haben dazu geführt, dass heutzutage hauptsächlich Polyacrylnitril-basierte Fasern verarbeitet werden. Das notwendige Ziehen und Strecken der Fasern in Längsrichtung während des Herstellungsprozesses bewirkt, dass sich die Graphitebenen primär in Faserrichtung ausbilden und so die späteren Zugkräfte optimal aufnehmen können. Die jeweiligen Ausgangsrohstoffe haben einen unterschiedlich hohen Kohlenstoffanteil und sind mit ihren prozentualen Inhaltsstoffen der Molekülstruktur in Tabelle 4.2-1 aufgeführt:

<b>Rohstoff</b>	<b>C</b> [%]	<b>H</b> [%]	<b>N</b> [%]	<b>O</b> [%]	<b>S</b> [%]	<b>Ausbeute CF</b> [%]
PAN	68	6	24	-	-	45
MPP	94	4	1	0,6	0,4	85

Tabelle 4.2-1: Kohlenstoffanteil im Ausgangsrohstoff [12]

Die Eigenheit des Precursors aus Mesophasenpech, bereits mehr Kohlenstoff im Ausgangszustand zu enthalten als Polyacrylnitrilfasern, ermöglicht den auf MPP basierten Kohlenstofffasern eine höhere, finale Reinheit der Graphitebenen und damit einen höheren Elastizitätsmodul (E-Modul). Für die Herstellung von Verstärkungsfasern werden diese kohlenstoffhaltigen Faservorprodukte durch einen Wärme- und Oberflächenbehandlungsprozess gezogen, um deren anvisierten Festigkeitseigenschaften einzustellen. Dabei durchlaufen diese zuerst die Stabilisierungsphase bei Temperaturen von 200 °C bis 300 °C und erfahren so die Umwandlung des Precursors in ein nicht schmelzbares Zwischenprodukt. Während dieser Oxidationsstufe erfolgt die Cyclisierung der Nitrilgruppe und die Dehydrierung der C-C-Kette durch Sauerstoff [12]. Die nachgeschal-

tete Karbonisierung findet dann bei einer Temperatur von ca. 1.400 °C in Stickstoffatmosphäre statt und bewirkt den Aufbau von reinen, hochfesten Kohlenstoffringen durch Ausschleusen der Heteroatome. Bei dieser Temperaturbehandlung werden höchste Festigkeitswerte erreicht und die Fasertypen HT und IM (Intermediate Modulus) hergestellt. Für die Erzeugung von Hochmodulfasern ist ein Graphitisierungsschritt notwendig, der bei einer Temperatur von ca. 3.000 °C durchgeführt wird. In einer Argon-Atmosphäre werden die restlichen Wasserstoffatome weiter aus den Kohlenstofffaserprecursoren dezimiert, der Ordnungsgrad wird erhöht und somit der E-Modul vergrößert. Die nachstehende Abbildung 4.2-1 (links) verdeutlicht durch strukturelle Modelle von einer Kohlenstofffaser die beschriebenen Veränderungen durch die Graphitisierung sowie den prinzipiellen Aufbau eines Kohlenstofffaserfilamentes (vgl. Abbildung 4.2-1 (rechts)).

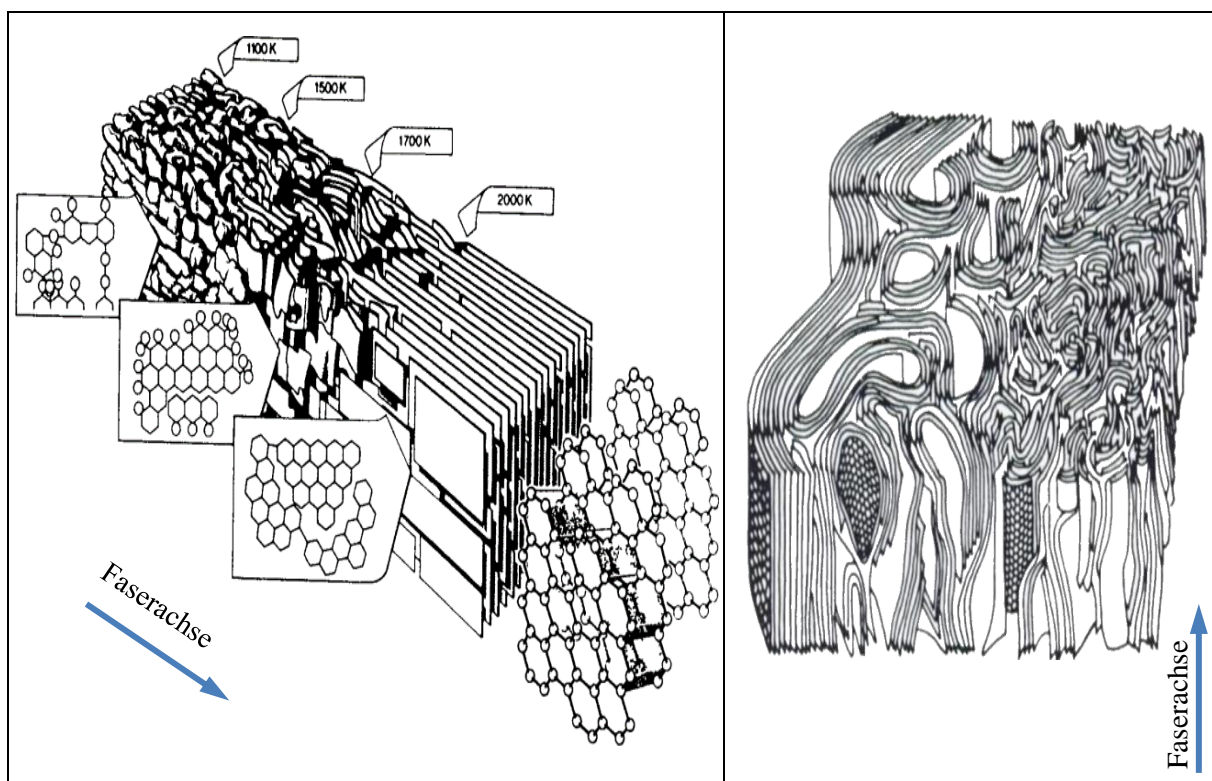


Abbildung 4.2-1: Strukturmodell einer Kohlenstofffaser während der Graphitisierung (links) [95] und strukturelles Modell eines auf PAN basierenden Kohlenstofffaserfilamentes (rechts) [12]

Durch die spezielle Temperaturbehandlung von Kohlenstofffasern erfahren deren Filamente eine erhöhte Energiezufuhr, welche die Hybridisierung der C-Atome begünstigt und damit die Bildung von Graphitebenen fördert. Die Vermehrung der Graphitstruktur durch Erwärmung der Kohlenstofffasern wurde durch rasterelektroskopische und strukturelle Untersuchungen belegt [12, 95, 96] und lässt sich mit Blick auf die Eigenschaften der unterschiedlichen Fasertypen konkludieren (vgl. Abbildung 4.2-2).

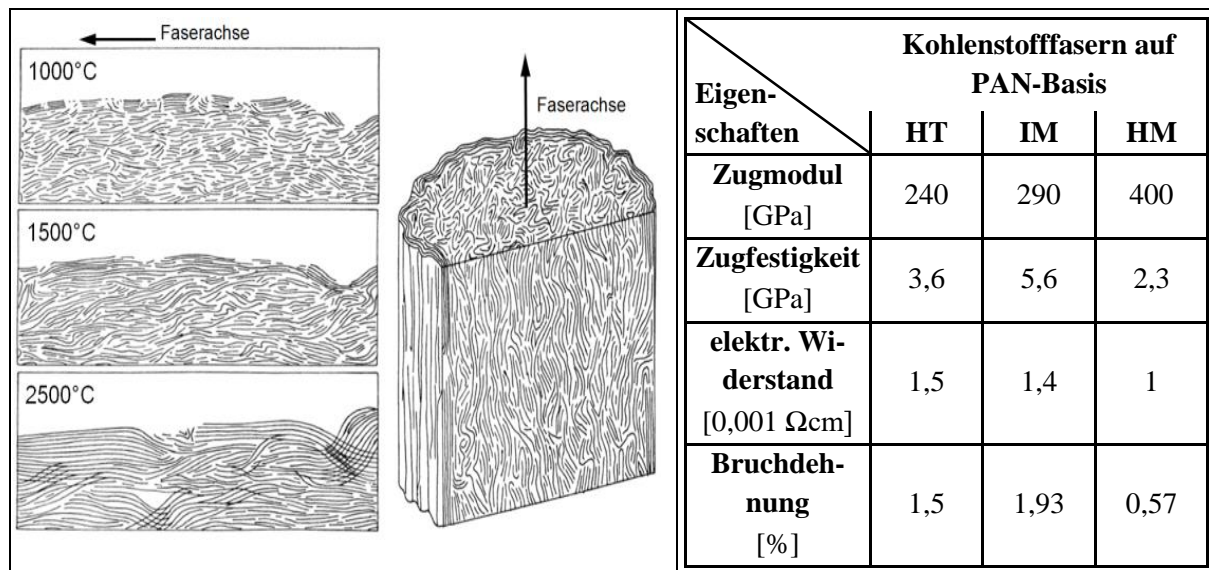


Abbildung 4.2-2: Strukturdarstellung einer Kohlenstofffaser bei unterschiedlichen Temperaturen (links) [96] und Tabelle 4.2-2: Eigenschaften von Kohlenstofffasern (rechts) [12]

Die in Abbildung 4.2-2 (links) mit erhöhter Temperatur einhergehende Ausbildung und Verkettung von Graphitebenen lässt sich auch in den Festigkeits- und Widerstandswerten der jeweiligen Fasertypen erkennen. So sind ansteigende Elastizitätsmodule kohärent zu den sinkenden elektrischen Widerstandswerten des betrachteten Fasertyps aufgrund der ausgebildeten Graphitebenenstruktur des Körpers. Die erst ansteigenden, dann sinkenden Zugfestigkeitswerte spiegeln das optimale Verhältnis vom Reinheitsgrad der Graphitschichten versus Vermeidung des Abgleitens der Basalebenen unter Belastung durch Fehlstellen wieder.

Neben den Prozesstemperaturen sind die Ausgangswerkstoffe ausschlaggebend für die Qualität der Verstärkungsfasern. Auf PAN basierte Verstärkungsfasern weisen in ihrem Ausgangsrohstoff einen gegenüber MPP basierten Fasern um ca. 28 % niedrigeren Kohlenstoffanteil (vgl. Tabelle 4.2-1) auf. Es bedarf eines weitaus höheren energetischen Aufwandes, diese größere Anzahl an Fremdatome aus PAN-Fasern zu entfernen, um in den Kohlenstofffaserprecursoren den Ordnungsgrad zu erhöhen. In einer grafischen Gegenüberstellung in Abbildung 4.2-3 (links) von PAN- und Pechfasertypen bzgl. Festigkeit, E-Modul und dessen Herstellungstemperatur wird dieser Unterschied deutlich.

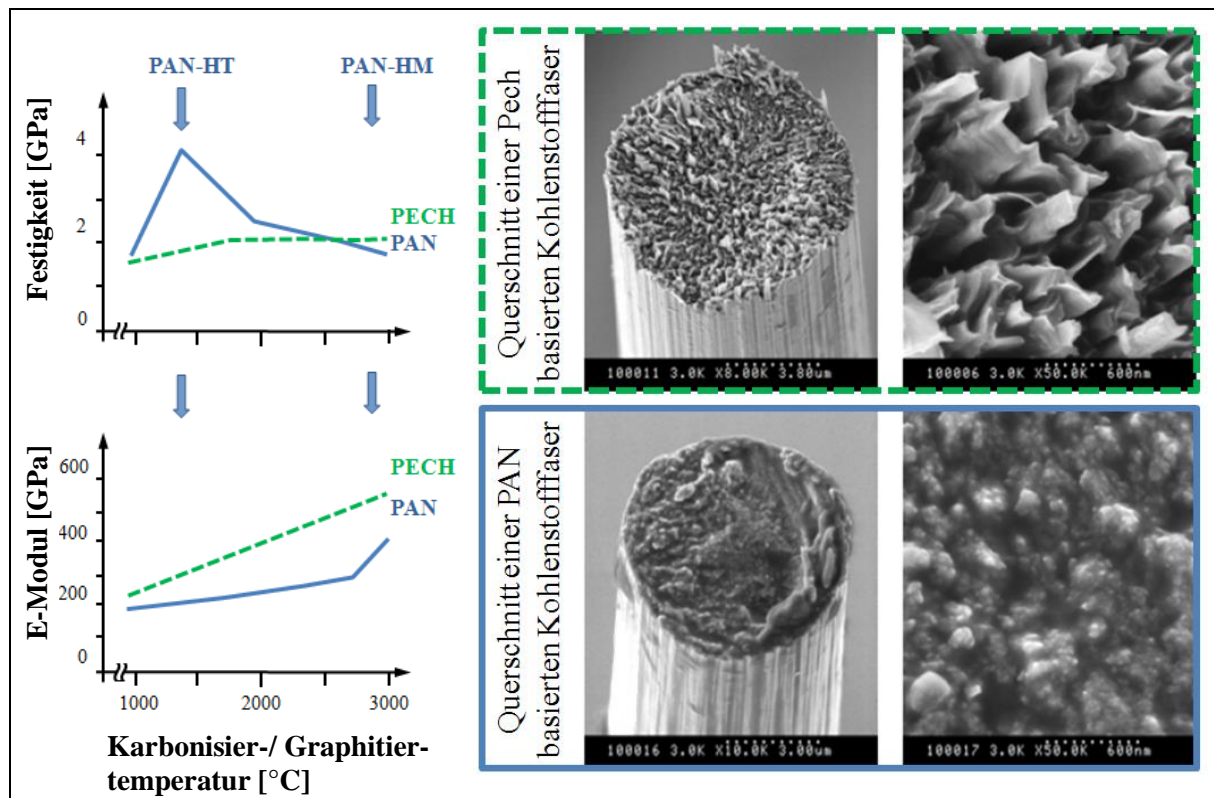


Abbildung 4.2-3: Mechanische Eigenschaften von Kohlenstofffasern auf PAN- und Pechbasis (links) [12] und REM-Aufnahme von Pech und PAN basierten Kohlenstofffilamenten (rechts) [97]

Werden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der verschiedenen Fasertypen im Querschnitt betrachtet, wie in Abbildung 4.2-3 (rechts), sind die unterschiedlich stark ausgeprägten Graphitstrukturen gut zu erkennen. Diese hervorstechenden Basalebenen sind der Garant für einen hohen E-Modul, aber auch anfällig gegenüber einem Abgleiten der Schichten gegeneinander und somit niedrigeren Festigkeitswerten als beispielsweise auf PAN basierte Fasertypen.

### 4.3 Elektrische Leitfähigkeit

Kohlenstofffasern sind elektrisch leitfähig, da für die  $sp^2$ -Hybridisierung des Graphits nur drei Valenzelektronenpaare für die Bindungen herangezogen werden. Die unverwendeten Elektronen formen sich zu  $\pi$ -Bindungen zusammen und bewegen sich auf delokalisierten Molekülorbitalen zwischen den Basalebenen. Bei der Anlegung einer Spannung können diese Elektronen den Strom zwischen den sechseckig angeordneten Schichten leiten. Senkrecht zu den Basalebenen kann der Graphit den Strom nicht leiten und fungiert dort als Isolator. Der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  ergibt sich aus der eingestellten Graphitstruktur und liegt bei einer HT-Faser bei ca.  $20 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  und bei einer HM-Faser bei ca.  $8 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  [29].

Im gewöhnlich erhältlichen Graphit sind zahlreiche dieser Kristalle unregelmäßig angeordnet, sodass sich unterschiedliche Ebenen in hoher Winkelvarianz berühren und somit die Stromleitungseigenschaft auch in Faserquerrichtung ermöglichen. Die nachstehende Illustration Abbildung 4.3-1 verdeutlicht diesen realen Aufbau der sich kreuzenden Basalebene einer Kohlenstofffaser.

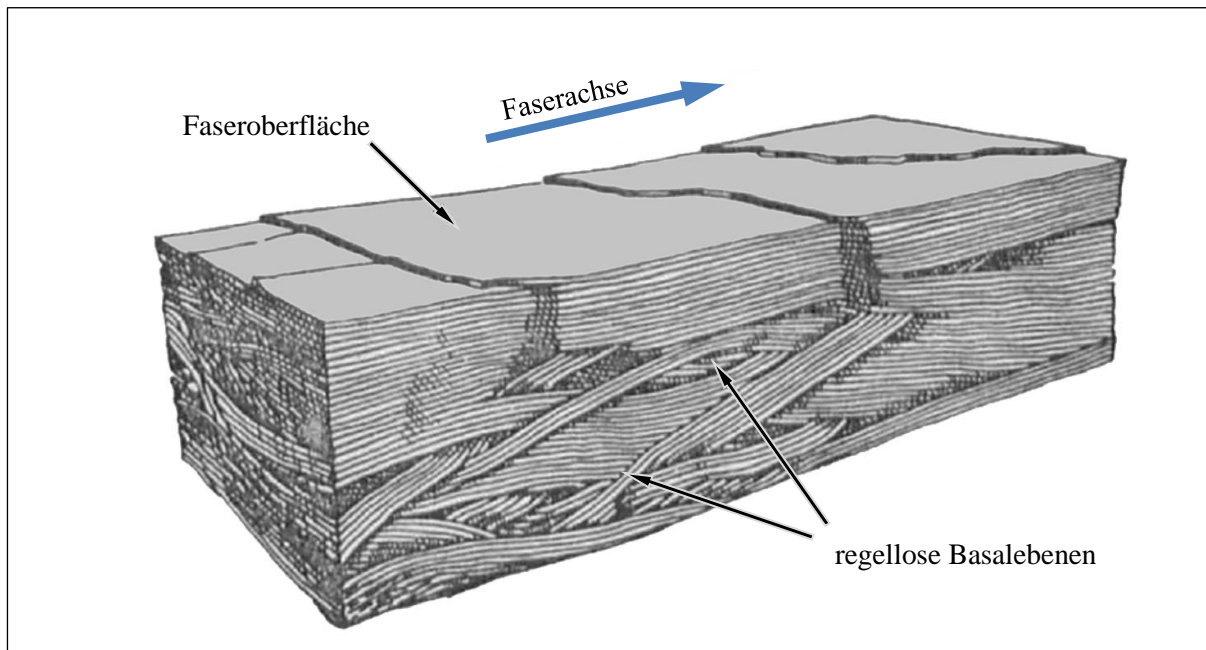


Abbildung 4.3-1: Anordnung der Basalebene in einer Kohlenstofffaser [96]

Es existieren bereits erste Ansätze, um die elektrische Leitfähigkeit quer zur Faserrichtung über eine Modifikation des Halbzeuges zu erhöhen (vgl. [98]). Eine Untersuchung bzgl. Zweckmäßigkeit und Verbesserungsgrad betreffend einer Direktbestromung wurde jedoch noch nicht durchgeführt.

## 4.4 Kontaktierungsvarianten

Kohlenstofffasern weisen gegenüber Kupfer relativ schlechte elektrischen Leitfähigkeiten auf [99]. Damit diese dennoch als ohmsche Widerstandsheizung mit homogener Wärmeverteilung zu nutzen sind, sollten die Übergangswiderstände an den Kontaktierungsstellen möglichst klein sein. Für das Betreiben von CFK-Heizungen werden vorzugsweise niedrigere Spannungen und höhere Ströme  $> 50\text{ A}$  eingestellt, wobei größere Übergangswiderstände an den Kontaktierungsstellen demzufolge zu einer überhöhten Erwärmung führen. Da bei den Übergangsflächen von elektrisch gut leitenden Materialien – wie beispielsweise Kupfer – zu Kohlenstofffasern der Widerstand bezogen zur Flächeneinheit sehr groß ist, kann ein schräg zur Längsrichtung der Kohlenstofffasern



generierter Anschnitt des ausgehärteten CFK-Laminates die resultierenden Kontaktierungsbedingungen verbessern. Die erzeugte vergrößerte Oberfläche der Kohlenstofffasern wird mit Hilfe eines elektrisch leitfähigen Klebers in Kontakt zu dem elektrischen Leiter der Stromquelle gebracht (vgl. Abbildung 4.4-1 (oben links)) [100]. Ein anderer Lösungsansatz ist, die primär längs laufenden Kohlenstofffasern des zu kontaktierenden Halbzeuges einzeln oder bündelweise mittels gequetschter, metallischer Hüllen und anschließender Verlotung dieser mit den stromführenden Leitungen zu verbinden (vgl. Abbildung 4.4-1 (oben rechts)) [78]. Mit dieser Kontaktierungsvariante wird gegenüber der Schrägkontaktierungsmethode der Übergangswiderstand noch mehr verringert, allerdings ist die Herstellung dieser Verbindungsart sehr aufwendig.

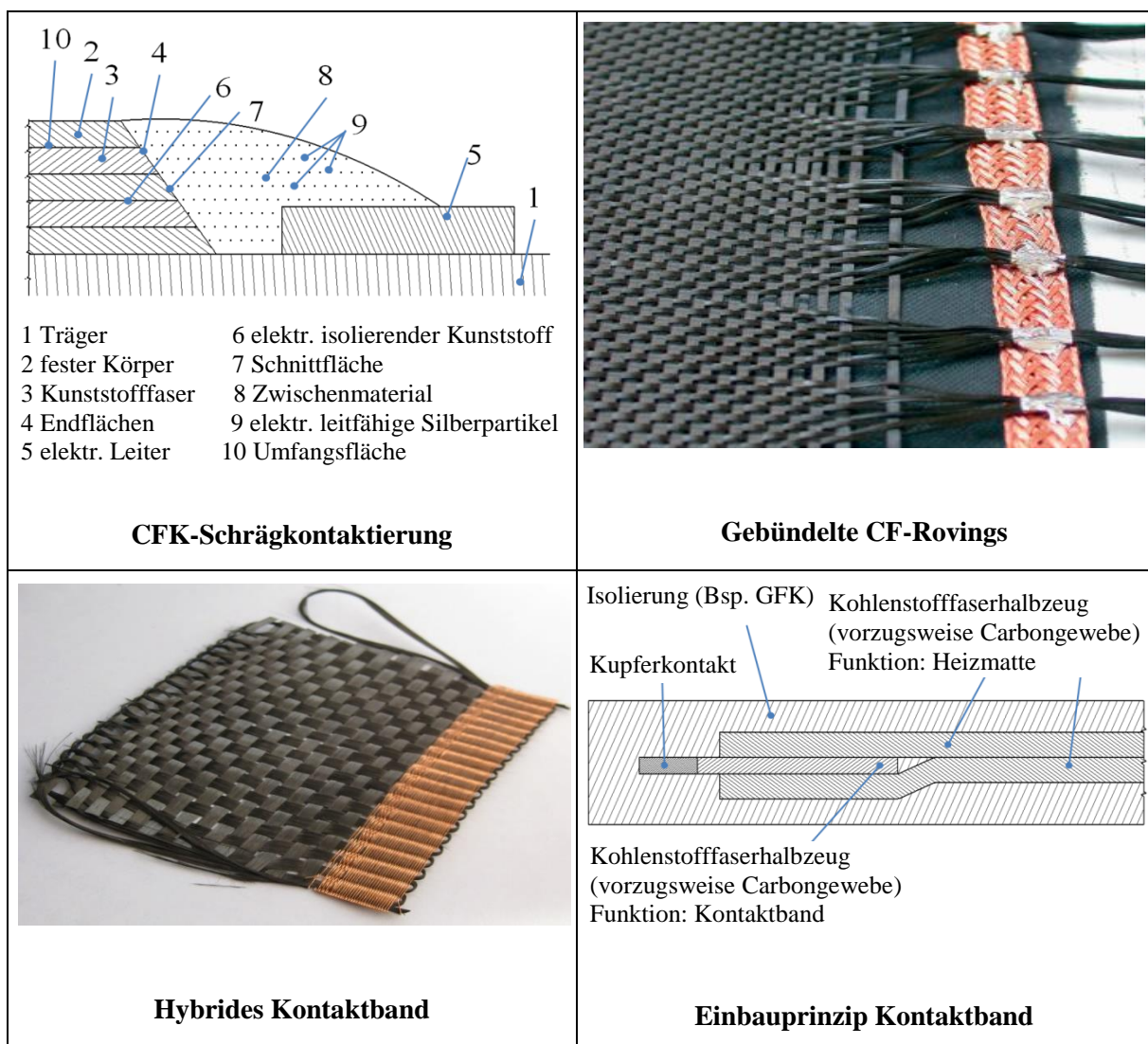


Abbildung 4.4-1: Kontaktierungsvarianten von Kohlenstofffasern [78, 100, 101, 102]

Eine Weiterentwicklung dieser Ansätze zu einer reproduzierbaren, automatisierbaren und kostengünstigeren Kontaktierungsmethode ist die dauerhafte Verbindung von leit-

fähigen Fäden mit den Kohlenstofffasern durch beispielsweise Verwirken, Vernähen oder Verweben (vgl. Abbildung 4.4-1 (unten links)). Untersuchungen an unterschiedlichen Laminataufbauten (Gewebe­flächengewicht von 64 g/m<sup>2</sup> bis 400 g/m<sup>2</sup>) haben ergeben, dass bei der Verwendung von eingelegten Kontaktbändern (Breite 2–5 cm) der Strom von Gewebelage zu Gewebelage mit kaum messbarem Übergangswiderstand eingeleitet wird [102]. Für den prinzipiellen Einsatz in einem eigenbeheizten Aushärte­werkzeug werden die hybriden Kontaktierungsbänder vorzugsweise zwischen zwei Gewebelagen platziert, die als Widerstandsheizung fungieren sollen (vgl. Abbildung 4.4-1 (unten rechts)). Die doppelseitige Anlage von Kohlenstofffasermaterial an das Kontaktband führt dabei zu einer Querschnittsvergrößerung in diesem Bereich, wodurch der Übergangswiderstand und die damit verbundene Generierung von lokalen Temperaturerhöhungen im Kontaktierungsbereich vermieden werden kann. Dieser Aufbau wird beidseitig von Glasfasertrennmatten umschlossen, um den Kontakt zu anderen Bauelementen oder dem zu fertigenden Bauteil zu unterbinden [102].

## 4.5 Wärmeentwicklung im Kontaktierungsbereich

Für größere Stückzahlen ist ein automatisiertes Fertigungskonzept meistens zielführend, jedoch müssen hierfür entsprechende Voraussetzungen erfüllt sein. Betreffend der hier thematisierten direkten Stromeinleitung in das Faserhalbzeug müssen die Kontaktierungselemente nicht nur den Strom optimal einleiten, sondern auch eine wieder lösbare und zugleich kostengünstige Variante darstellen. Dies bedeutet, dass die Einflussfaktoren für einen niedrigen Übergangswiderstand bekannt sein müssen, um die Wärmeentwicklung und damit verbundene Anhaftungsmechanismen der thermoplastischen Anteile des Halbzeuges sowie entstehende Verlustleistung an diesen Klemmen zu minimieren. Möglichst große Kontaktflächen und eine hohe elektrische Leitfähigkeit der Kontaktmaterialien sind der Garant für einen niedrigen Kontaktwiderstand. Kupfer eignet sich – unter Berücksichtigung der Materialkosten – besonders gut als Kontaktwerkstoff und bietet nach Silber die höchste elektrische Leitfähigkeit ( $\sigma_{\text{Cu}} \geq 58,0 \cdot 10^6 \text{ m}$ ) [103] aller Metalle.

Generell besteht die Problematik eines elektrischen Kontaktes in der Praxis darin, dass sich die Kontaktpartner nicht auf der maximal möglichen Fläche berühren, sondern durch Welligkeiten, Rauigkeiten und Verunreinigungen viele einzelne Kontaktierungsflächen entstehen. Bei Faserverbundwerkstoffen wird oftmals eine ungleichmäßige Oberflächenstruktur durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der Materialpaarungen – verbunden mit den herstellungsbedingten Wärmebehandlungsprozessen und den damit resultierenden, divergierenden Schrumpfungsverhalten – hervorgerufen. Besonders stark treten diese Effekte bei Gewebhalbzeugen auf, da die verwobenen Verstärkungsfasern, je nach Webart, durch deren Ondulation untereinander ein welliges

Höhenprofil erzeugen. Somit ergeben sich in den entstehenden, größeren Zwischenräumen lokale Harzansammlungen, die durch eine aushärtungsbedingte Harzschrumpfung zu einer unebenen Oberfläche führt. In der nachfolgenden Abbildung 4.5-1 ist ein Kontaktierungsvorgang mit resultierender Kontaktfläche schematisch dargestellt.

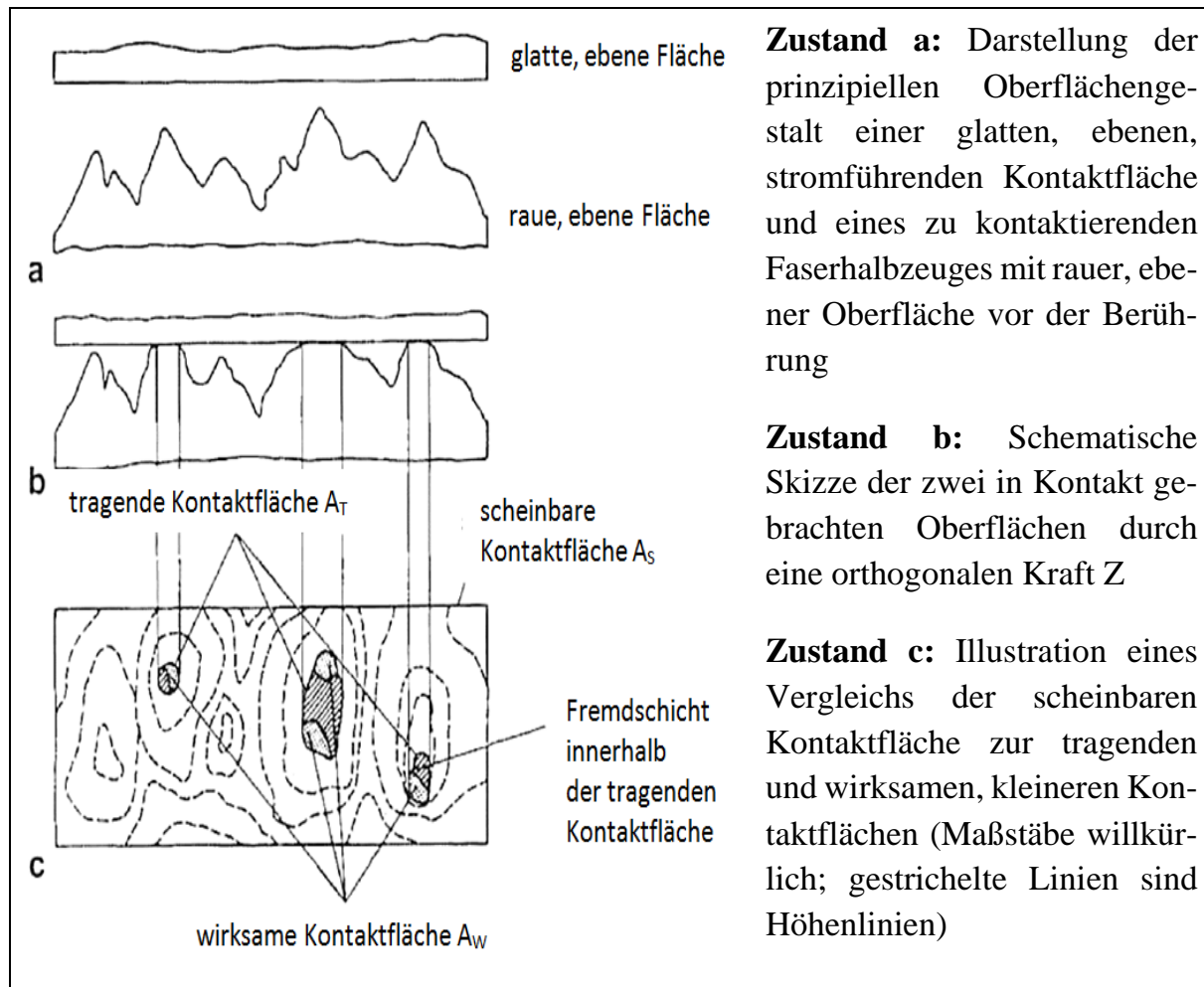


Abbildung 4.5-1: Gegenüberstellung von scheinbarer und wirksamer Kontaktfläche [99]

Die gezeigten Fügemechanismen implementieren die Abhängigkeit der Kontaktkraft bezogen auf die wirksame Kontaktfläche. So werden bei einem ersten, kraftlosen Kontakt lediglich die äußersten Spitzen berührt. Erst mit zunehmender Anpresskraft kann die Welligkeit elastisch bis plastisch verändert und damit die Kontaktfläche erhöht werden. Durch Lösen dieser Kontaktierung geht der elastisch verformte Anteil der Welligkeit wieder in die ursprüngliche Form zurück. Somit erfolgt die Stromübertragung bei festen Kontaktierungspaarungen über eine Vielzahl von Kleinstflächen. Deren Anzahl, Verteilung und Größe ist von zahlreichen Faktoren wie Kontaktkraft, Kontaktform, Temperatur, Werkstoffeigenschaften und Oberflächenstruktur abhängig [99]. Durch diese Reduktion auf einzelne, in der Summe kleinere Berührungspunkte werden Stromengstellen ausgebildet, durch die eine höhere Stromdichte hindurchfließen muss, was zu einer erhöhten Wärmeentwicklung führt. Dieser sogenannte Engwiderstand kann demzufolge



durch eine erhöhte Kontaktkraft bzw. der damit einhergehenden Vergrößerung der Berührungsflächen sowie durch Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Kontaktmaterials reduziert werden.

Die resultierend wirksame Kontaktfläche  $A_w$  ergibt sich aus der Summe der faktisch tragenden Fläche  $A_T$ , reduziert um die Flächenanteile, die mit Fremdschichten behaftet sind. Fremdschichten haben einen hohen Widerstand bis hin zur Isolation und entstehen durch Korrosion, thermische Oxidation oder sonstige Verunreinigungen. Dickere Fremdschichten müssen zerstört werden, um eine adäquate Stromleitung zu gewährleisten. Dies kann durch Frittung geschehen. Dabei entsteht zuerst eine leitfähige Stelle, die sich durch die hohe Stromdichte thermisch erwärmt und dadurch flächenmäßig ausbreitet [99]. Zur Erhöhung der Anzahl der wirksamen Flächen ist eine geringe Oberflächenrauigkeit erstrebenswert. Eine zusätzliche Verbesserung kann eine Oberflächenbeschichtung aus Zinn, Zinnsilber, Silber und Gold erzielen, da diese ebenfalls glättend wirken.

Der Durchgangswiderstand  $R_K$  der Kontaktierungszone teilt sich somit in den Engwiderstand  $R_E$  und Fremdschichtwiderstand  $R_F$  auf.

$$R_K = R_E + R_F \quad (4-1)$$

Der Zusammenhang zwischen Kontaktwiderstand und entstehende Verlustleistung  $P_v$ , welche sich in Wärmeentwicklung offenbart, sieht wie folgt aus:

$$P_v = I^2 \cdot R_K \quad (4-2)$$

Je höher die Verlustleistung an den Klemmen, desto weniger Leistung kann für die Erwärmung des Materials verwendet werden. Hinzu kommt die Erkenntnis, dass hohe Kontaktwiderstände hohe Verlustleistungen ergeben und somit eine steigende Erwärmung an den Stromeinleitungspunkten entsteht.

## 5 Thermodynamische Beschreibung

Es existieren vielfältige Aufheizvarianten, welche für verschiedenste Bauteilherstellungsverfahren attraktive Lösungen zur Verfügung stellen (vgl. Kapitel 2.4 *Erwärmungsvarianten*). Damit die geeignetste Lösung für einen geplanten Serienprozess mit vorgegebenen Randbedingungen gefunden werden kann, sind Analysen der jeweiligen Energieflüsse ratsam, um eventuelle Verbesserungspotenziale aufzudecken und Maßnahmen zur Energieeinsparung einzuführen. Ein Maß für die Energiewandlung ist der Wirkungsgrad  $\eta$ , der das Verhältnis der Nutzleistung  $P_{ab}$  zur zugeführten Leistung  $P_{zu}$  angibt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad (5-1)$$

Ein grafisches Hilfsmittel zur Visualisierung von Energieflüssen ist das Sankeydiagramm. Mit ihm können absolute und relative Energieflüsse anschaulich dargestellt und unterschiedliche Verfahren verglichen werden. Im Folgenden werden die zu- und abgeführten Energien einer herkömmlichen Infrarotaufheizung den Energieflüssen des Direktbestromungskonzeptes gegenübergestellt.

### 5.1 Energieflussbetrachtung

Dem Vorteil, den Infrarotstrahler durch ihre relativ niedrigen Anschaffungskosten und kontaktlose Aufheizung des Halbzeuges gegenüber Kontaktheizelementen haben, wirken die höheren Verluststrahlungen entgegen. Durch den Abstand der Heizstrahler zur erwärmenden Oberfläche wird ein Ankleben durch Aufschmelzen der Matrix bei Organoblechen verhindert. Aber der erzeugte und auch notwendige Mindestabstand  $d$  (vgl. Kapitel 2.4.2 *Infrarotstrahler*) induziert Spaltmaße, die mit anwachsender Größe zu ansteigenden Verluststrahlungen  $\dot{q}_V$  führen. Kältere Luftströme, die zwischen dem Spalt hindurchfließen, führen Energie von Halbzeug und Strahler ab. Die vom Infrarotstrahler emittierte und vom Halbzeug absorbierte Strahlung wird durch dessen Aufheizung zum Teil transmittiert  $\dot{q}_t$  und wider an die Umgebung abgegeben. Neben den Verlusten der IR-Strahler durch unkontrollierte Abstrahlungen nach oben und zu den Seiten wird dessen emittierte Strahlung, je nach Oberflächenbeschaffenheit, teilweise direkt wieder

durch Reflexion zurückgeworfen  $\dot{q}_r$ . In der folgenden Abbildung 5.1-1 ist das entsprechende Sankeydiagramm für den beschriebenen Energiefluss mit relativen Größen dargestellt.

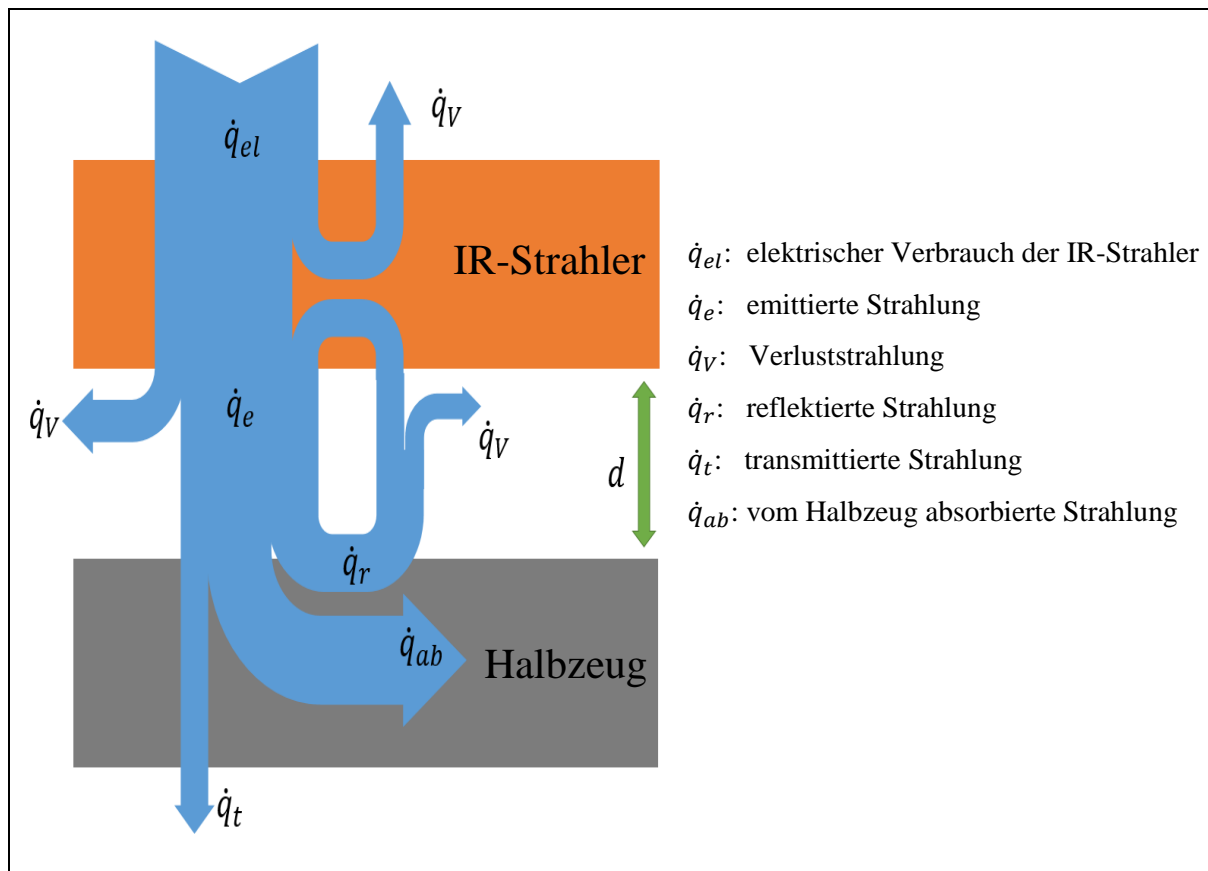


Abbildung 5.1-1: Energieflussdiagramm eines einseitigen IR-Heizfeldes zur Halbzeugerwärmung [104]

Es wird deutlich, dass sehr viel aufgebrauchte Energie nicht in das Halbzeug, sondern in die Umgebung als sogenannte Verlustenergie übergeht. Außerdem ist die Flexibilität bei Infrarot-Heizfeldern – wie auch bei zahlreichen anderen Aufheizkonzepten (z. B. Kontaktheizung) – bezüglich der Größe und Dickentopologie der aufzuheizenden Körper eingeschränkt. Eine Flexibilität bezüglich einer homogenen Erwärmung differierender Halbzeuggeometrien ist mittels segmentierter und individuell einstellbarer IR-Heizfelder prinzipiell abdeckbar. Diese verursachen jedoch aufgrund ihrer kaum erfüllbaren optimalen Konfiguration je Probengeometrie proportional anwachsende Verlustleistungen. Für gekapselte Heizfelder (wie beispielsweise auch Autoklav, Ofen) bestimmen die maximalen Abmessungen eines aufzuheizenden Halbzeuges den vorzuhaltenden Raum und können bei kleineren Bauteilen – aufgrund ihrer aufdiktierten Größe – oft nicht energieeffizient arbeiten. Da die in das Halbzeug eingeleitete Energie bei der Widerstandsheizung direkt eingeleitet wird, sind die entstehenden Verluste wesentlich geringer. In der folgenden Abbildung 5.1-2 sind die Energieflüsse von einem Infrarot-Heizfeld dem der Direktbestromung in vereinfachter Form gegenübergestellt.

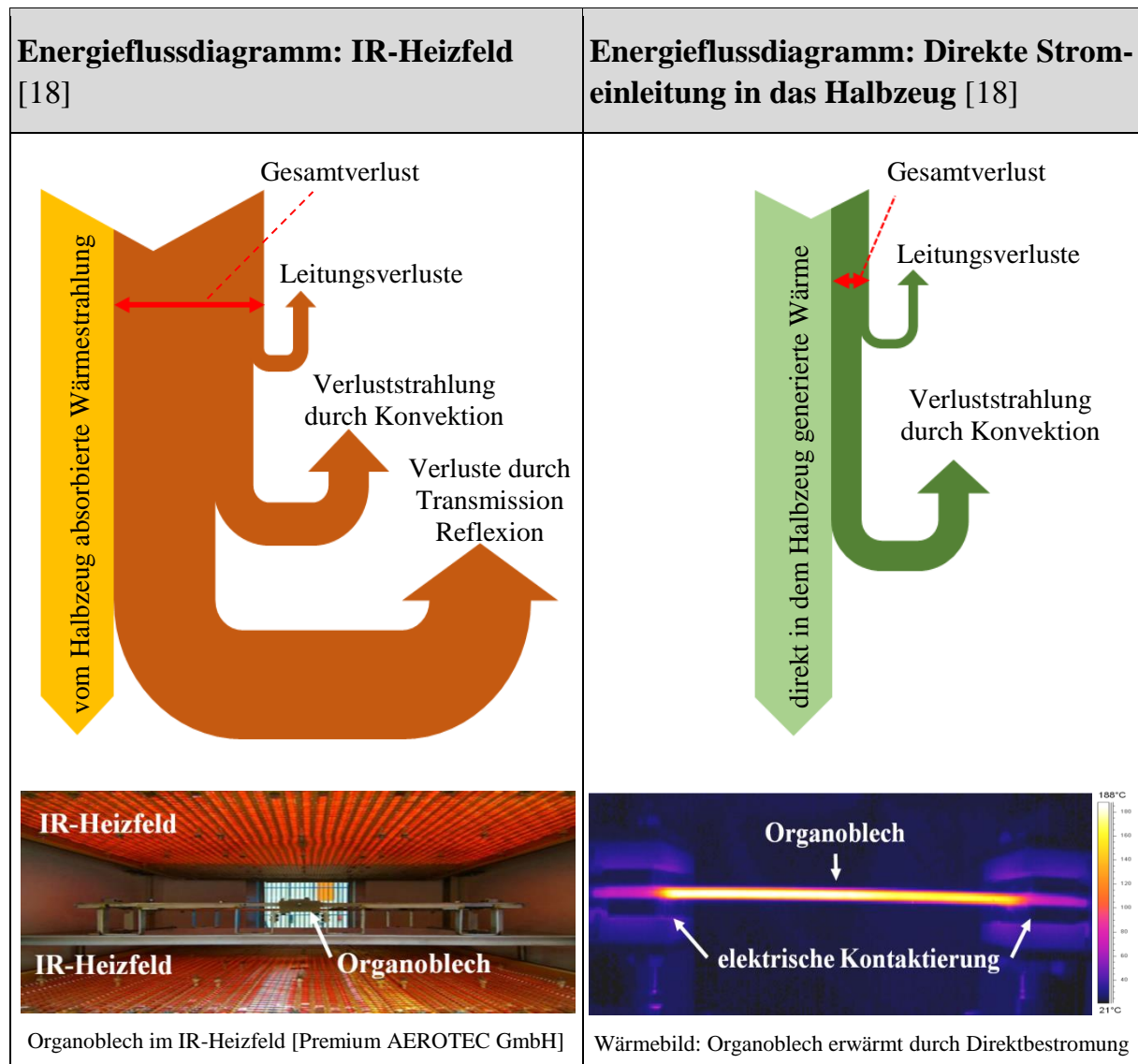


Abbildung 5.1-2: Gegenüberstellung vom Energiefluss der IR-Erwärmung versus Direktbestromung

Es zeigt sich sehr deutlich, dass der Weg, den die Energie von der Erzeugung (IR-Strahler) zum aufzuheizenden Organoblech zurücklegen muss, bei der Widerstandsheizvariante wesentlich kürzer ist. Weniger Energie weicht somit vom Weg der beabsichtigten Übertragungsstrecke ab. Die Verluste durch Reflexion tauchen bei der Widerstandsheizung nicht auf. Lediglich die Energieabflüsse durch Konvektion und Leitungsverluste bleiben bestehen, fallen jedoch aufgrund ihrer kürzeren Wirkzeit gegenüber der längeren Aufheizzeit des Organoblechs durch die IR-Strahler wesentlich kleiner aus. Zu beachten ist außerdem, dass die IR-Heizfelder eine gewisse Vorwärm- bzw. Aufwärmzeit benötigen, um die optimale Leistung an das Halbzeug übertragen zu können. Bei der direkten Stromeinleitung startet der Erwärmungsvorgang sofort mit maximal eingestellter Leistung ohne Anlauf- bzw. Verzögerungszeit. In den nachstehenden schemati-

schen Darstellungen (vgl. Abbildung 5.1-3) sind diese prinzipiellen Erwärmungsvorgänge der beiden Aufheizvarianten stilistisch zusammengefasst. Die dunkleren Farben repräsentieren dabei die niedrigeren und die hellen die höheren Temperaturbereiche.

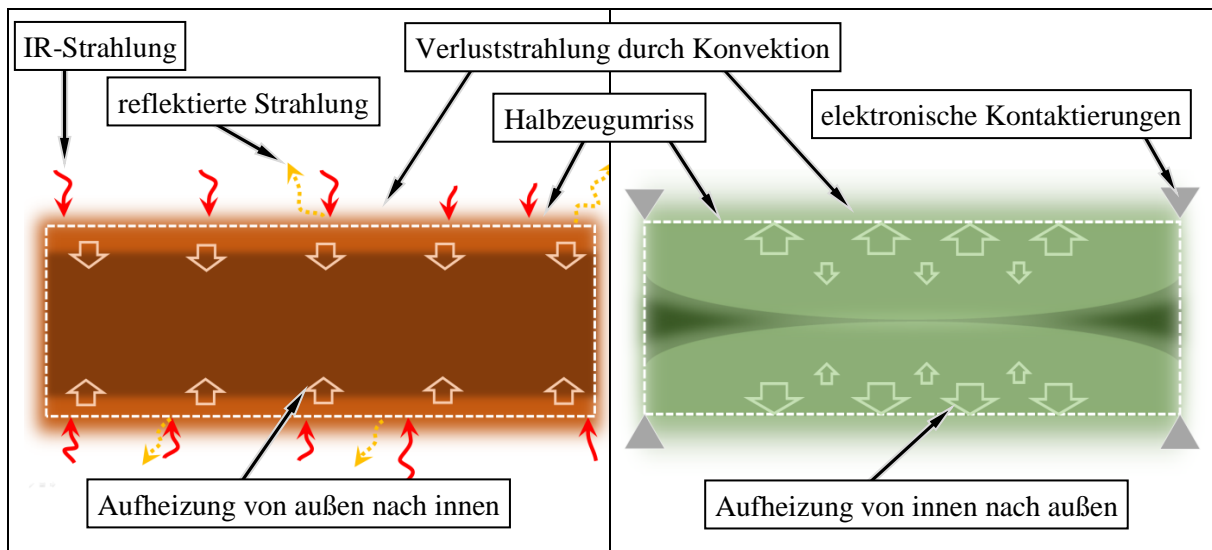


Abbildung 5.1-3: Aufheizprinzip von IR-Strahler (links) und Aufheizprinzip einer direkten Erwärmung des Halbzeuges durch beidseitige Stromeinleitung (rechts)

Die Vorgänge der Wärmeentwicklung bei der Direktbestromung beruhen auf den gewonnenen Erkenntnissen aus den Vorversuchen (vgl. Kapitel 6.4 *Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern*). Die Wärmeleitung im Inneren des Organoblechs wird bei beiden Verfahren durch die Wärmeleiteigenschaften der Matrix bestimmt. Bei der Widerstandsheizvariante ist die Temperaturdifferenz der innen liegenden Bereiche aufgrund der auch im Inneren des Halbzeuges wirkenden Widerstandsheizung jedoch wesentlich geringer.

## 5.2 Thermodynamische Modellbildung

Im Folgenden soll eine technische Modellbildung durchgeführt werden, um eine entsprechende Formel zu generieren, welche die Einflüsse von Größe, Halbzeugart und eingeleiteten Stromstärke zur sich einstellenden Temperaturerhöhung in Abhängigkeit von der Zeit beinhaltet.

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist eine temperaturabhängige Materialkonstante und ein Maß für die Fähigkeit des betreffenden Körpers, Energie in Form von Wärme zu transportieren. Zur Berechnung der Wärmestromdichte  $\dot{q}$  aus dem Temperaturgradienten  $\nabla T$  tritt diese als Proportionalitätsfaktor auf (Fouriersches Gesetz):

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T \quad (5-2)$$

Die Integration der Wärmestromdichte über die Fläche ergibt dann den Wärmestrom:

$$\dot{Q} = \int \dot{q} d\vec{A} \quad (5-3)$$

Für die Beschreibung der Fähigkeiten von Flüssigkeiten oder Gasen, die Energie von der Oberfläche eines Körpers abzuführen oder abzugeben, wurde der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  eingeführt. Im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit ist dieser keine Materialkonstante, sondern ein Proportionalitätsfaktor, der die Intensität des Wärmeübergangs an der Grenzfläche bestimmt. Er ist abhängig von der Art der Strömung (laminar oder turbulent), den geometrischen Gegebenheiten, der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Art des umgebenden Fluids. Die übertragene Wärmemenge  $Q$  und der Wärmestrom  $\dot{Q}$  lassen sich dann mit dem Wissen der betrachteten Fläche  $A$ , den Temperaturen der beteiligten Medien  $T_1, T_2$ , dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und dem Zeitintervall  $\Delta t$  wie folgt bestimmen:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \cdot \Delta t \quad (5-4)$$

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (5-5)$$

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ergibt sich der Zusammenhang der inneren Energie  $U$  zu der aus dem System zu- oder abgeführten Energie in Form von Arbeit  $W$  oder Wärme  $Q$  zu:

$$dU = dQ + dW \quad (5-6)$$

Eine Ableitung nach der Zeit ergibt:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{U}_{12} = \dot{Q}_{12} + P_{12} \quad (5-7)$$

Das Prinzip der Widerstandsheizung beruht auf der Dissipation elektrischer Energie. Durch das Anlegen einer Spannung  $U$  bewegen sich elementare Ladungsträger (Elektronen), welche durch den jeweiligen Widerstand  $R$  im kontaktierten Leiter gebremst

werden, weshalb diese Bewegungsenergie in Wärme bzw. innere Energie dissipiert wird. Die Definition der elektrischen Leistung lautet:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (5-8)$$

Durch die Einführung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  ergibt sich ein vereinfachter Zusammenhang, jedoch keine exakte physikalisch-mathematische Beschreibung der komplexen Vorgänge, da die den Koeffizienten beeinflussenden Faktoren bereits starr integriert sind. Für eine genauere Berechnung der Wärmeübergangsvorgänge müssen die Koeffizienten  $\alpha_S$  für Strahlung und  $\alpha_K$  für Konvektion aus dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  herausgelöst werden.

$$\dot{Q}_{12} = \dot{Q}_S + \dot{Q}_K = \alpha_S \cdot A_S \cdot (T_1 - T_2) + \alpha_K \cdot A_K \cdot (T_1 - T_0) \quad (5-9)$$

Wenn die Umgebungstemperatur  $T_0$  gleich der Körperwandtemperatur  $T_2$  und die Oberfläche der durch Konvektion  $A_K$  sowie durch Strahlung  $A_S$  übertragende Wärmeleistung identisch und gleich der Körperoberfläche sind, so kann durch Addition der speziellen Wärmeübergangskoeffizienten, betreffend Strahlung und Konvektion, der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  bestimmt werden:

$$\alpha = \alpha_S + \alpha_K \quad (5-10)$$

Zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten der Strahlung ergibt sich folgende Gleichung:

$$\alpha_S = \varepsilon(T_2) \cdot \sigma(T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \quad (5-11)$$

Mit dem Emissionsgrad  $\varepsilon$ , welcher bei Kohlenstofffaser bei 0,95 liegt (vgl. [105]), und der Stefan-Boltzmann-Konstanten  $\sigma$  kann der Wert für  $\alpha_S$  ermittelt werden. Die Konstante  $\sigma$  beträgt nach derzeitiger Messgenauigkeit (vgl. [106]) mit der Boltzmannkonstante  $k_B$ , den Planckschen Wirkungsquantum  $h$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$ :

$$\sigma = \frac{2\pi^5 \cdot k_B^4}{15h^3 \cdot c^2} = (5,670373 \pm 0,000021) \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \quad (5-12)$$

Die genaue mathematische Bestimmung der durch Konvektion vom Körper abgeführten Wärmeleistung ergibt ein System von Differenzialgleichungen (vgl. [107]), welches nur in einigen Fällen lösbar ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten der Ansatz der Ähnlichkeitstheorie herangezogen. Dieser lässt sich aus der Nusselt-Zahl  $Nu$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der charakteristischen Länge  $L$  wie folgt bestimmen:

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (5-13)$$

Für wärmeabgebende, quadratische Platten mit der Länge  $l$  und der Breite  $b$  ergibt sich für die charakteristische Länge ein Zusammenhang von:

$$L = \frac{l \cdot b}{2(l + b)} \quad (5-14)$$

Da die in der Industrie am häufigsten vorkommende Variante der Handhabung des Faserhalbzeuges die horizontale Ausrichtung ist, wird für die folgenden Berechnungen der Ansatz für horizontale bis schwach ( $\pm 30^\circ$ ) geneigte quadratische Platten mit Wärmeabgabe an der Oberseite gewählt. Die Formel für eine diesbezügliche Nusselt-Zahl ergibt sich mit der Raleigh-Zahl  $Ra$  und der Prandl-Zahl  $Pr$  dann zu:

$$Nu = 0,766(Ra \cdot f(Pr))^{\frac{1}{5}} \quad (5-15)$$

mit

$$f(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,322}{Pr} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{\frac{20}{11}} \quad (5-16)$$

Die notwendige Prandl-Zahl erschließt sich aus dem Verhältnis von kinematischer Viskosität  $\nu$  und der Temperaturleitfähigkeit  $a$  zu:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (5-17)$$



Für Luft können Werte laut VDI-Wärmeatlas [108] für  $\nu$  bei 1 bar Druck von  $151,1 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}^{-1}$  und für  $\alpha$ , bei identischen Randbedingungen, von  $211,9 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}^{-1}$  angenommen werden. Die Raleigh-Zahl ist das Ergebnis der Multiplikation der Grashof-Zahl  $Gr$  mit der Prandl-Zahl:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (5-18)$$

Das Verhältnis des statischen Auftriebs eines Fluids zu der auf das Fluid wirkenden Kraft durch Viskosität wird durch die Grashof-Zahl ausgedrückt, welche sich wie folgt zusammensetzt:

$$Gr = \beta(T_1 - T_2) \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \quad (5-19)$$

Dabei steht  $\beta$  für den kubischen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Durch die Zusammenfassung der Gleichungen ergibt sich für den Wärmeübergangskoeffizienten demnach:

$$\alpha_K = \frac{(\lambda \cdot \beta^{\frac{1}{5}}) \cdot 0,766 \left( (T_1 - T_2) \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot Pr \cdot f(Pr) \right)^{\frac{1}{5}}}{L} \quad (5-20)$$

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der kubische Wärmeausdehnungskoeffizient  $\beta$  sind temperaturabhängige Größen. Da der eingeleitete Strom das Halbzeug erwärmt, steht dieser im direkten Zusammenhang zur sich einstellenden Temperatur im Halbzeug. Je nach Herstellungsart des betrachteten Körpers können die realen Kennwerte stark von der Norm abweichen und sind für Faserverbundwerkstoffe – aufgrund ihrer Varianten und Kombinationsvielfalt – kaum greifbar. Da in der Literatur derzeit lediglich rudimentäre Kennwerte für allgemeine Standardwerkstoffe existieren, sollen diese Werte aus experimentell ermittelten Daten abgeleitet werden. Aus diesem Grund werden diese stoffbezogenen Größen  $\lambda$  und  $\beta$  aus der Gleichung isoliert und zu einer neuen Übergangsgröße  $K_{t_{CF}}$  (für trockene Kohlenstofffasern ohne Matrix) und  $K_{T_{CFK}}$  (für Kohlenstofffasern in thermoplastischer Matrix eingebettet) zusammengefasst:

$$K_{t_{CF}} = (\lambda_{t_{CF}} \cdot \beta_{t_{CF}}^{\frac{1}{5}}) \quad (5-21)$$

bzw.

$$K_{T_{CFK}} = (\lambda_{T_{CFK}} \cdot \beta_{T_{CFK}})^{\frac{1}{5}} \quad (5-22)$$

Daraus folgt:

$$\alpha_K = \frac{K_{t_{CF}} \cdot 0,766 \left( (T_1 - T_2) \frac{g \cdot L^3}{v^2} \cdot Pr \cdot f(Pr) \right)^{\frac{1}{5}}}{L} \quad (5-23)$$

bzw.

$$\alpha_K = \frac{K_{T_{CFK}} \cdot 0,766 \left( (T_1 - T_2) \frac{g \cdot L^3}{v^2} \cdot Pr \cdot f(Pr) \right)^{\frac{1}{5}}}{L} \quad (5-24)$$

Die notwendigen Gleichungen für die auftretenden Verluste in Form von Strahlung und Konvektion sind gefunden und können in eine detaillierte Gesamtgleichung eingegliedert werden. Hierzu wird die Ausgangsgleichung (5-7) mit den Gleichungen (5-8) und (5-9) erweitert. Damit ergibt sich eine Aufteilung der eingeleiteten Leistung  $P$  in Verlustleistungen durch Strahlung und Konvektion sowie in den Anteil der theoretisch notwendigen Leistung zur Erwärmung des Halbzeuges in einem bestimmten Zeitintervall  $\Delta t$ :

$$P = \alpha_S \cdot A_S \cdot (T_1 - T_2) + \alpha_K \cdot A_K \cdot (T_1 - T_0) + P_{theo} \quad (5-25)$$

Mit der vereinfachten Formel für die theoretische Leistung nach einer definierten Zeit  $\Delta t$  lässt mit der Masse der Fasern  $m_F$  und der Matrix  $m_M$  sowie deren spezifischen Wärmekapazitäten  $c_F$  und  $c_M$  diese wie folgt berechnen:

$$P_{theo} = \frac{(m_F \cdot c_F + m_M \cdot c_M) \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (5-26)$$

Im nächsten Schritt wird diese Gleichung (5-26) sowie die Gleichungen (5-23) beziehungsweise (5-24) eingepflegt und jeweils nach den Übergangsgrößen umgestellt. Daraus ergibt sich für  $K_{t_{CF}}$ :

$$K_{t_{CF}} = L \left( \frac{(I^2 \cdot R) - P_{theo} - \alpha_S \cdot A_S \cdot (T_1 - T_2)}{A_K \cdot (T_1 - T_0) \cdot 0,766 \left( (T_1 - T_2) \frac{g \cdot L^3}{v^2} \cdot Pr \cdot f(Pr) \right)^{\frac{1}{5}}} \right) \quad (5-27)$$

und für  $K_{T_{CFK}}$ :

$$K_{T_{CFK}} = L \left( \frac{(I^2 \cdot R) - P_{theo} - \alpha_S \cdot A_S \cdot (T_1 - T_2)}{A_K \cdot (T_1 - T_0) \cdot 0,766 \left( (T_1 - T_2) \frac{g \cdot L^3}{v^2} \cdot Pr \cdot f(Pr) \right)^{\frac{1}{5}}} \right) \quad (5-28)$$

Diese Übergangsgrößen werden im Folgenden aus entsprechenden Versuchsaufbauten ermittelt, damit deren Abhängigkeiten in Zusammenhang mit der thematisierten Widerstandsheizung bestimmt werden können. Für  $K_{t_{CF}}$  wird eine Versuchskonfiguration, welche detailliert in Kapitel 6.4 *Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern* beschrieben wird, herangezogen. Die Grundlage für die Wertebestimmung sind 18 Versuche mit variierender Stromstärke von 20 – 50 A. Die Werte für  $K_{T_{CFK}}$  werden nach einer Versuchskonfiguration, die detailliert in Kapitel 6.5 *Thermische Eigenschaften von Fasermatrix-Verbunden* dargestellt wird, bestimmt. Diesbezüglich werden 29 Versuche mit PPS-Faserverbundprobenkörpern bei unterschiedlichen Stromstärken von 80 A – 142,7 A zur Manifestation der Größe durchgeführt. Die jeweils ermittelten Kurvenverläufe sind in der folgenden Übersicht dargestellt:

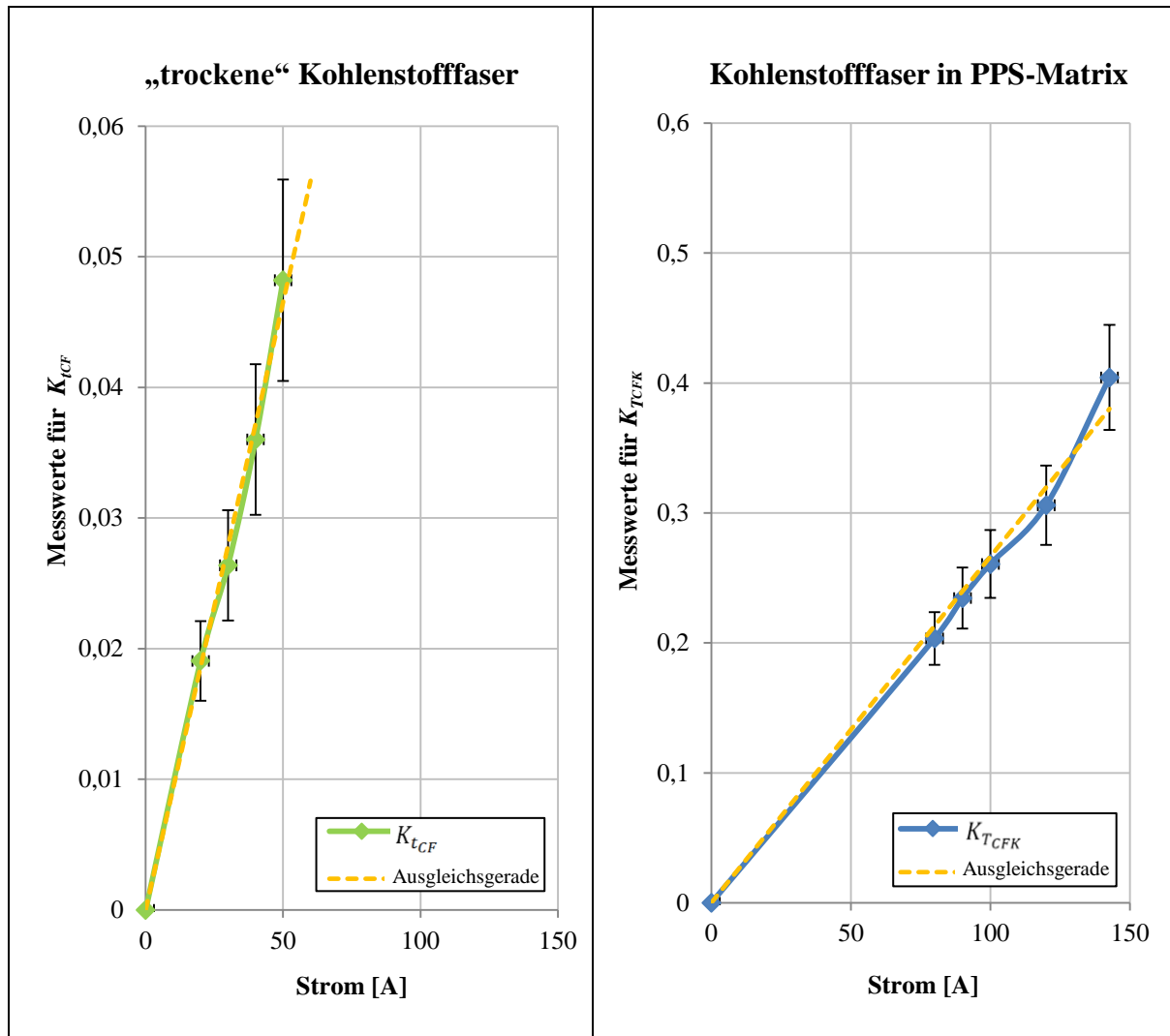


Abbildung 5.2-1: Gegenüberstellung von Strommenge und experimentell ermittelten  $K_{tCF}$ -Werten (links) sowie Gegenüberstellung von Strommenge und  $K_{TCFK}$  Werten (rechts)

Anhand der Graphen wird ersichtlich, dass sich die experimentell erfassten  $K$ -Werte proportional zum Strom  $I$ , der in das betreffende Halbzeug eingeleitet wird, verhalten. Aus dieser gewonnenen Erkenntnis können mit folgenden Gleichungen die  $K$ -Werte zu spezifischen Kenngrößen  $k_{tCF}$  und  $k_{TCFK}$  umgewandelt werden:

$$k_{tCF} = \frac{K_{tCF}}{I} \quad (5-29)$$

bzw.

$$k_{TCFK} = \frac{K_{TCFK}}{I} \quad (5-30)$$

Für die Kenngrößen ergeben sich die ermittelten Werte mit Fehlertoleranz zu:

$$k_{t_{CF}} = 9,10 \cdot 10^{-4} \pm 4,08 \cdot 10^{-5} \quad (5-31)$$

Und:

$$k_{T_{CFK}} = 2,60 \cdot 10^{-3} \pm 1,54 \cdot 10^{-4} \quad (5-32)$$

Durch Zusammenfügen der aufgelisteten Einzelgleichungen und Einsetzen der ermittelten Kennwerte ergibt sich folgende quadratische Gesamtgleichung für Kohlenstofffasern in thermoplastischer Matrix:

$$I^2 - k_{T_{CFK}} \left( \frac{0,766 \cdot A (\Delta T) \left( (\Delta T) \frac{g \cdot \left( \frac{l \cdot b}{2(l+b)} \right)^3}{v^2} \cdot Pr \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,322}{\frac{v}{a}} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{-\frac{20}{11}} \right)^{\frac{1}{5}}}{R \cdot \left( \frac{l \cdot b}{2(l+b)} \right)} \right) I \quad (5-33)$$

$$- \frac{\frac{(m_F \cdot c_F + m_M \cdot c_M) \cdot \Delta T}{\Delta t} - (\varepsilon(T_2) \cdot \sigma(T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2)) \cdot A (\Delta T)}{R} = 0$$

Und für trockene Kohlenstofffasern ohne Matrix:

$$I^2 - k_{t_{CF}} \left( \frac{0,766 \cdot A (\Delta T) \left( (\Delta T) \frac{g \cdot \left( \frac{l \cdot b}{2(l+b)} \right)^3}{v^2} \cdot Pr \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,322}{\frac{v}{a}} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{-\frac{20}{11}} \right)^{\frac{1}{5}}}{R \cdot \left( \frac{l \cdot b}{2(l+b)} \right)} \right) I \quad (5-34)$$

$$- \frac{\frac{m_F \cdot c_F \cdot \Delta T}{\Delta t} - (\varepsilon(T_2) \cdot \sigma(T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2)) \cdot A (\Delta T)}{R} = 0$$

Mit diesen quadratischen Gleichungen ist es jetzt möglich, fehlende Werte, wie beispielsweise die notwendige Stromstärke zur Beheizung eines Faserverbundbauteils mittels Widerstandsheizung, zu bestimmen. Einen entsprechenden Nachweis über die Güte der Vergleichbarkeit dieser errechneten zu realen Werten soll durch zwei Beispielrechnungen aufgezeigt werden. Ein Organoblech (Probe: CFPS677) wurde zu diesem Zweck in 63 s von 30,3 °C auf 316,3 °C durch eine beidseitige Stromeinleitung in dem bereits thematisierten Versuchsaufbau (vgl. Kapitel 6.5 *Thermische Eigenschaften von Faser-matrix-Verbunden*) erwärmt. Die notwendigen Eingangsdaten für die theoretische Berechnung der erforderlichen Stromstärke sind in der nachstehenden Tabelle 5.2-1 aufgeführt:

Bezeichnung	Größe	Maßeinheit
Probenlänge	292	mm
Probenbreite	54,5	mm
Bestromungsstrecke	200	mm
Elektr. Widerstand der Probe	0,1366	$\Omega$
Ausgangstemperatur	30,3	$^{\circ}\text{C}$
Endtemperatur	316,3	$^{\circ}\text{C}$
Zeitdauer	63	s
Spez. Wärmekapazität PPS	1830	J/kgK
Spez. Wärmekapazität Faser	710	J/kgK
Faservolumenanteil	50	%
Gewicht der Probe	106	g
Emissionsgrad Faser + Matrix	0,95	
Temperaturleitfähigkeit von Luft	0,00002119	$\text{m}^2/\text{s}$
Kinematische Viskosität von Luft	0,00001511	$\text{m}^2/\text{s}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	5,67E-08	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$

Tabelle 5.2-1: Eingangsdaten für Beispielrechnung 1 mit Probe CFPS677 [12, 36, 106, 109]

Die notwendige Stromstärke errechnet sich nach der Gleichung (5-33) zu  $102,17 \text{ A} \pm 3,07 \text{ A}$ . Die tatsächlich am Netzteil eingestellte Stromstärke zur Erwärmung des Halbzeuges in 63 s auf  $316,3^{\circ}\text{C}$  betrug 100 A. Eine hinreichend genaue Vorhersage der benötigten Stromstärke durch die aufgeführte Gleichung ist somit möglich.

Zur Überprüfung der theoretischen Werte für trockene Kohlenstofffaserhalbzeuge sollen 42,55 g unidirektionale Tenax-HTA-400TEX-6-K-PAN-Fasern mit 1,25 % Epoxidharzschichte innerhalb von 11,72 s von  $29,5^{\circ}\text{C}$  auf  $120^{\circ}\text{C}$  erwärmt werden. Das Halbzeug wird in den Versuchsstand aus Kapitel 6.4 eingespannt und mit Strom durchflossen. Zur Berechnung der dafür erforderlichen Stromstärke sind folgende Daten notwendig:

Bezeichnung	Größe	Maßeinheit
Probenlänge	6 x 1	m
Probenbreite	27	mm
Bestromungsstrecke	1	m
Elektr. Widerstand der Probe	0,8940	$\Omega$
Ausgangstemperatur	29,5	$^{\circ}\text{C}$
Endtemperatur	120	$^{\circ}\text{C}$
Zeitdauer	11,72	s
Spez. Wärmekapazität Faser	710	J/kgK
Gewicht der Probe	42,55	g
Emissionsgrad Faser	0,95	
Temperaturleitfähigkeit von Luft	0,00002119	$\text{m}^2/\text{s}$
Kinematische Viskosität von Luft	0,00001511	$\text{m}^2/\text{s}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	5,67E-08	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$

Tabelle 5.2-2: Eingangsdaten für Beispielrechnung 2 mit Kohlenstofffasern [12, 106, 109]

Die Stromstärke errechnet sich nach der Gleichung (5-34) zu  $30,14 \text{ A} \pm 0,51 \text{ A}$ . Die tatsächlich am Netzteil eingestellte Stromstärke zur Erwärmung des Halbzeuges in 11,72 s auf  $120^{\circ}\text{C}$  betrug 30 A. Somit kann auch hier festgehalten werden, dass eine Berechnung der notwendigen Stromstärke zur Erzeugung einer vorgegebenen Temperaturerhöhung in einem definierten Zeitintervall möglich ist.



## 6 Experimentelle Untersuchungen

In der Theorie (vgl. Kapitel 4 *Theoretische Grundlagen*) wurden Verhaltensweisen von Kohlenstofffasern aufgezeigt, die in den folgenden praktischen Versuchen untermauert werden. Der Fokus der Versuche liegt dabei auf die Überführung des Technologiekonzeptes in die Industrie zwecks Zykluszeit- und Energieaufwandsreduktion. Aus diesem Grund werden in den folgenden Unterkapiteln speziell die Wärmeentstehungsmechanismen, die bei einer Direktbestromung von Kohlenstofffasern wirken, identifiziert. Darüber hinaus werden die weiteren Abhängigkeiten, Eigenarten und typische Verhaltensmuster, die für ein wirtschaftliches Konzept zur direkten Stromeinleitung notwendig sind, mittels entsprechender Experimente ermittelt.

### 6.1 Thermische Leitfähigkeiten orthogonal zur Faserorientierung

In der Literatur werden Richtwerte bzgl. Wärmeleitfähigkeiten längs der Kohlenstofffaser für unterschiedliche Fasertypen angegeben; quer zur Faserrichtung sind diese jedoch nur fragmentarisch vorhanden. Die Herausforderung einer derartigen Spezifizierung liegt in der Herstellung von Kohlenstofffasern (vgl. Kapitel 4.2 *Herstellung von Kohlenstofffasern*) und der damit verbundenen Schwankung der inneren Struktur sowie des Faserdurchmessers. Untersuchungen bzgl. der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Kohlenstofffasern quer zu ihrer Faserorientierung werden mit einem Versuchsstand nach Vorgaben von DIN EN ISO 8302, zwecks Bestimmung des stationären Wärmedurchlasswiderstandes, mit einem Plattengerät durchgeführt. Als Testmaterial wurden TENAX-HTS- und TENAX-IMS5131-Fasern in unterschiedlichen Lagenkonfigurationen und Dicken untersucht. Die experimentell ermittelten Daten spiegeln die Tendenz der nach Kapitel 4.1 und 4.2 theoretisch zu erwartenden Charakteristika von Kohlenstofffasern wieder. Der Einfluss einer höheren Reinheit und eines höheren Ausbildungsgrades der Graphitstruktur der inneren Faserbereiche hin zu einem niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizienten sowie die Abhängigkeiten von Luft- und Kompaktierungsdruck auf die Wärmeleitfähigkeit konnte wiedergegeben bzw. bestätigt werden (vgl. [110]). Die Streuung der Ergebnisse ist aufgrund der inneren Varianz der Halbzeuge sowie des komplexen und störanfälligen Versuchsaufbaus zu groß, als dass diese in folgenden Versuchen als Vergleichswerte herangezogen werden könnten. Aus diesem Grund wird ein Versuchsstand zur konventionellen Erwärmung der Fasern mittels einseitiger Kontaktheizung erstellt, um repräsentative Wärmeübertragungswerte

orthogonal zu der Faserorientierung eines Kohlenstofffaserhalbzeugtyps zu generieren, die für folgende Untersuchungen als Referenz dienen sollen.

Eine Heizplatte mit einer Heizflächengröße von 600 mm x 600 mm erwärmt zu diesem Zweck mit konstanter Eingangsleistung einen definierten Faserlagenaufbau unterseitig. Sieben Thermoelement-Drahtfühler vom Typ-K detektieren die an der Heizfläche unterhalb des 500 mm x 500 mm großen Halbzeugs anliegende Temperatur je Zeiteinheit (vgl. Abbildung 6.1-1 links). Die Oberflächentemperatur jeder einzelnen Lage des gestapelten Halbzeuges mit um 100 mm abnehmender Umfangslänge je nächstfolgendem Zuschnitt wird synchron mittels einer Wärmebildkamera aufgezeichnet. Das Plattenheizwerkzeug mit den stufenförmig aufeinandergestapelten Halbzeugen aus neun Lagen biaxialem Tenax-HTS-Gelege (vgl. Datenblatt Anhang 13.3) ist in Abbildung 6.1-1 rechts dargestellt.

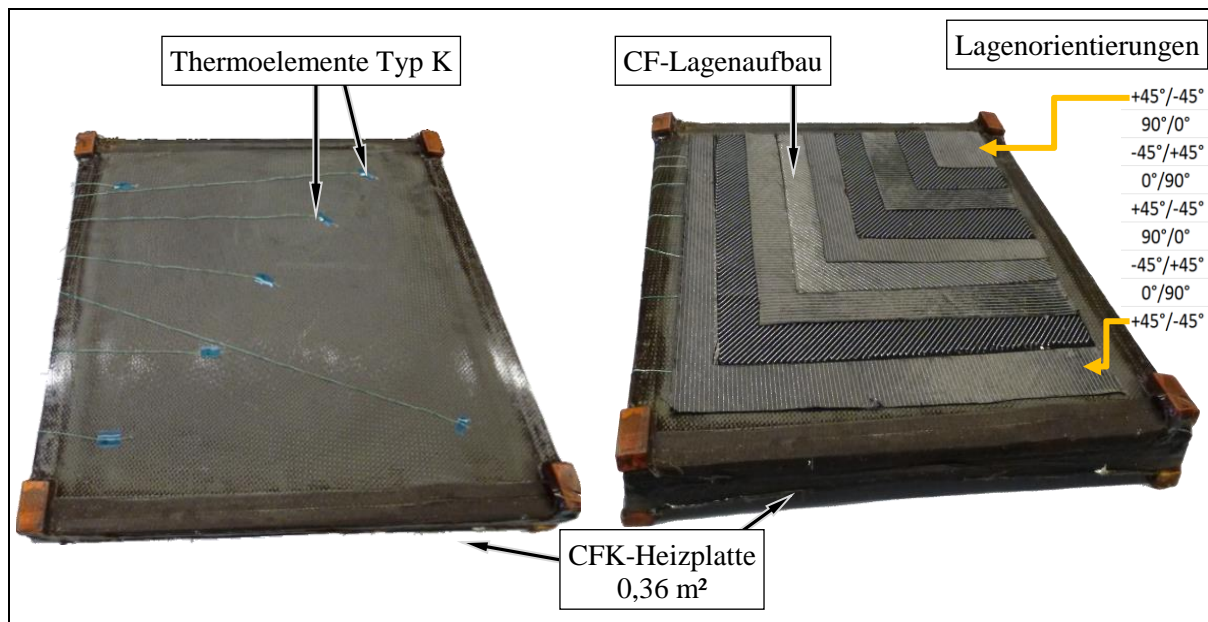


Abbildung 6.1-1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern orthogonal zur Faserachse

Die Zuschnittlagen werden in Anlehnung an einen praxistauglichen Fertigungsprozess von Verbundbauteilen mit einem Vakuumaufbau bei 1 mbar absolut. und 90 °C vorkompaktiert. Die Messung des Wärmedurchgangs an den Oberflächen erfolgt ohne Hilfsstoffe. Aus der ermittelten Oberflächentemperatur einer jeden Faserlage kann mit dem Bezug zum Temperaturniveau der jeweiligen unteren Lage eine Temperaturdifferenz bestimmt werden, aus der sich ein praktikabler Wärmedurchgangskoeffizient mit eingegliederten Umgebungseinflüssen ableiten lässt. In Abbildung 6.1-2 (links) sind die registrierten Temperaturverläufe der Lagen gegenüber der Zeit aufgetragen. Die Abbildung 6.1-2 (rechts) zeigt eine Momentaufnahme des abgestuften Lagenaufbaus als Wärmebild mit den Positionen der virtuellen Temperaturmessstellen, die eine definierte Wärmebildauswertung ermöglichen.

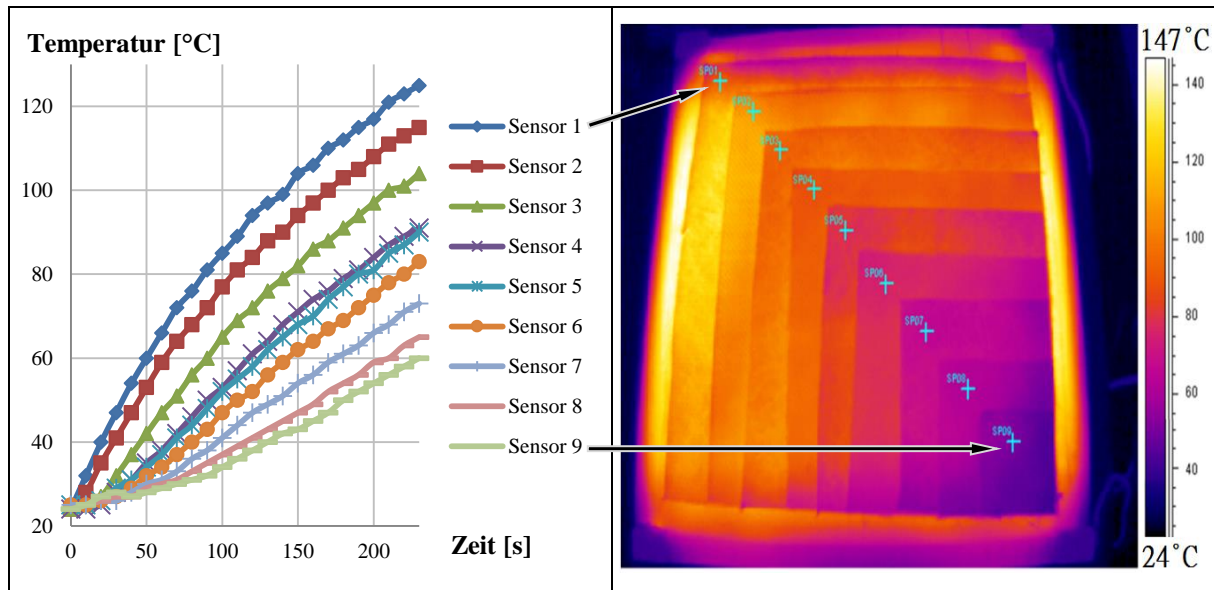


Abbildung 6.1-2: Kurvenverläufe der neun Oberflächensensoren (links) sowie Wärmebildaufnahme der Oberflächen mit Positionen der virtuellen Temperatursensoren (rechts)

Deutlich ist zu erkennen, dass mit erhöhter Lagenanzahl der Wärmedurchgangswiderstand ansteigt. Die Temperaturdifferenz von einer Kohlenstofflage zur nächstgelegenen wurde mit  $8,3 \% \pm 0,7 \%$  bei einer durchschnittlichen Aufheizrate der Heizplatte von  $29,2 \text{ K/min}$  bestimmt. Mit diesen ermittelten Anhaltswerten können nachfolgende Vergleiche von einer konventionellen Halbzeugerwärmung zum anvisierten Direktbestromungskonzept bei identischen Umgebungsbedingungen und durch die Verwendung gleicher Faserhalbzeuge gezogen werden.

## 6.2 Elektrodenkonfiguration

Das prinzipielle Widerstandsverhalten eines Faserhalbzeuges soll in diesem Kapitel untersucht werden. Von besonderer Bedeutung sind dabei die elektrischen Leiteigenschaften quer und längs der Kohlenstofffasern, um hieraus Rückschlüsse für eine optimale Stromeinleitung zur homogenen Temperaturerzeugung ableiten zu können.

Damit ein Direktbestromungskonzept in eine wirtschaftliche industrielle Fertigung zur Zykluszeit- und Energieaufwandsreduktion bei der Erwärmung von Kohlefaserverbundwerkstoffen etabliert werden kann, sollte das Kontaktierungsprinzip einen ausgewogenen Kompromiss zwischen minimierten Übergangswiderstand, sichere Handhabung, lösbare Verbindung, Möglichkeit zur Aufnahme von biegeschlaffen sowie formstabilen Halbzeugen und guter Automatisierbarkeit aufweisen. Diesbezüglich wurden unterschiedliche Klemmgeometrien und Materialpaarungen – mit dem Hintergrund der Er-



Damit die Bestromungsversuche mit CF-Halbzeugen durchgeführt werden können, wurden sechs entsprechend einstellbare Kontaktierungsklemmeinheiten entwickelt und gebaut. Nach diversen Entwicklungsstufen ist die finale Konfiguration in Abbildung 6.2-2 zu sehen. Mit dem Fokus auf Funktionalität sowie Gewichts- und Bauraumreduktion sind diese Klemmeinheiten in der Lage, einen bereitgestellten Zuschnitt automatisiert und reproduzierbar aufzunehmen, mit einstellbarer Klemmkraft zu halten und zu kontaktieren. Außerdem kann der ergriffene Zuschnitt definiert straff gezogen werden, um eine Faltenbildung zu vermeiden. Für einen möglichen, vorgesehenen Umformungsprozess nach der Erwärmungsphase ist in jeder Klemmeinheit eine Zugfeder entsprechend platziert, die eine Nachführung des Halbzeuges während des Umformprozesses ermöglicht. Zudem sind pneumatische Klemmzylinder installiert, um die resultierende Klemmposition nach der erstellten dreidimensionalen Geometrie des Halbzeuges zu fixieren.

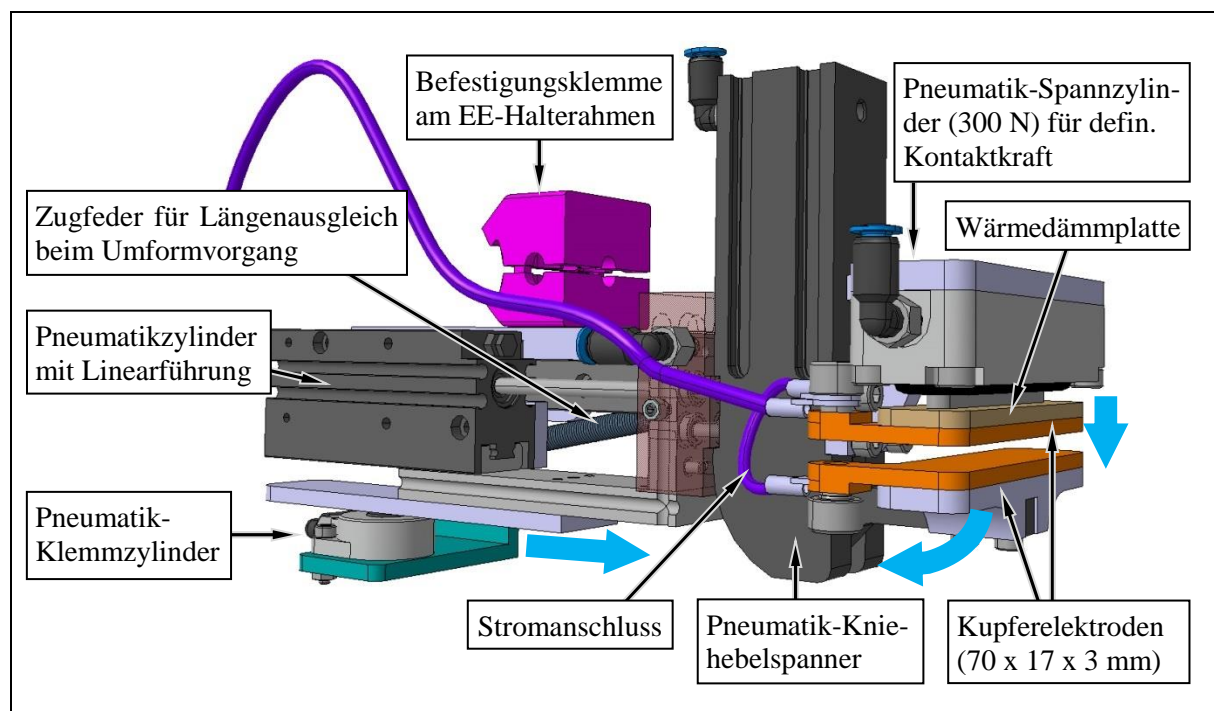


Abbildung 6.2-2: Klemmeinheit zur automatisierten Handhabung und Bestromung von CF

Damit der Trockenfasertestkörper (vgl. Abbildung 6.2-1) entsprechend definiert aufgenommen werden kann, wird ein eigens entwickelter Versuchsstand (vgl. Abbildung 6.2-2 (links)) konzipiert und gefertigt. Er soll die Widerstandscharakteristik von Kohlenstofffasern entsprechend der notwendigen Anforderungen zur Stromeinleitung erfassen. Die Halbzeuge werden definiert zwischen zwei gegenüberliegende, doppelseitige Kupferkontaktklemmen schwebend aufgenommen (vgl. Abbildung 6.2-2 (rechts)), wobei der Kontaktierungsdruck variabel ist, um den Einfluss der Klemmkraft auf den Widerstandswert zu bestimmen.



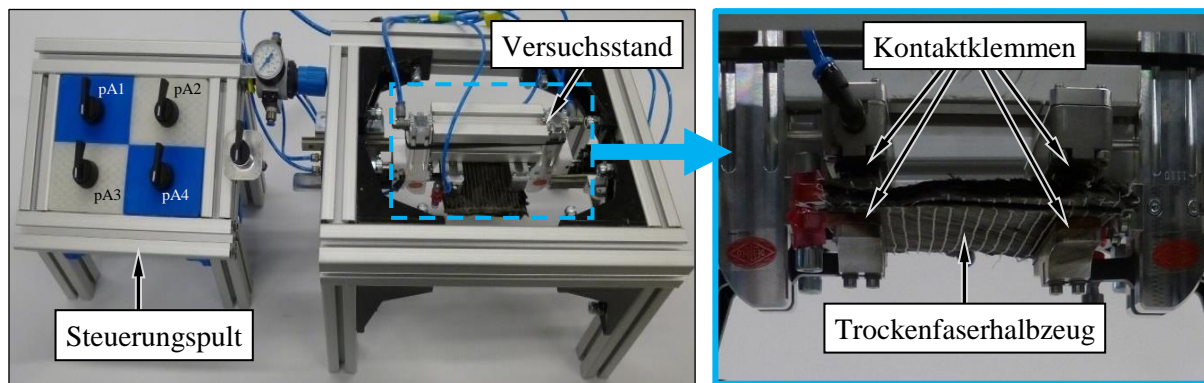


Abbildung 6.2-3: Versuchsaufbau zur elektrischen Widerstandsbestimmung von Kohlenstofffasern (links) und Detailaufnahme vom doppelseitig eingespannten Kohlefaserhalbzeug (rechts)

In der nachfolgenden Abbildung 6.2-4 sind die Funktionsmechanismen der Klemmeinheiten detailliert dargestellt. Mit den jeweils vier pneumatischen Aktuatoren (pA) je Klemmeinheit kann das Halbzeug wiederholgenau aufgenommen (pA1), mit einer einstellbaren Kontaktklemmkraft kontaktiert (pA2), auf definierter Spannung schwebend gehalten (pA3) und die eingestellte Halteposition fixiert werden (pA4).

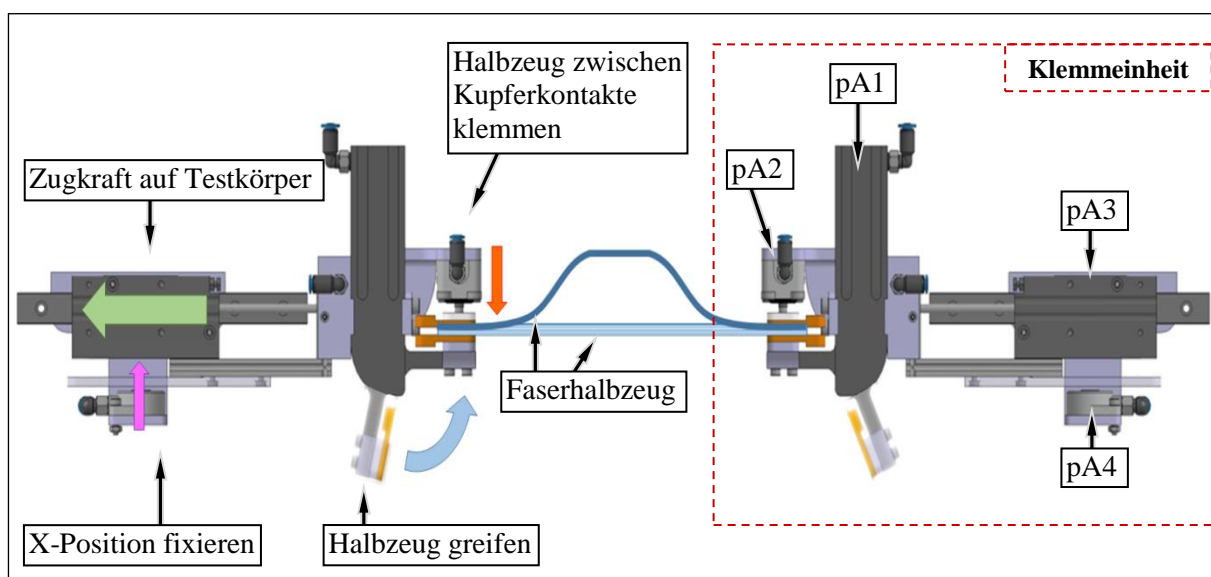


Abbildung 6.2-4: Funktionsweise der Klemmeinheiten zur einstellbaren Faserkontaktierung

Die Versuche erfolgen bei Raumtemperatur und es werden jeweils vier Messstrecken je Klemmdruckniveau und Testmaterialcharge (vgl. Abbildung 6.2-5) gemessen. Die ermittelten Widerstandswerte sollen Aufschluss über das elektrische Verhalten der Kohlenstofffasern im Gelegehalbzeug lateral, orthogonal sowie diagonal durch die jeweils kontaktierten Faserlagen geben.

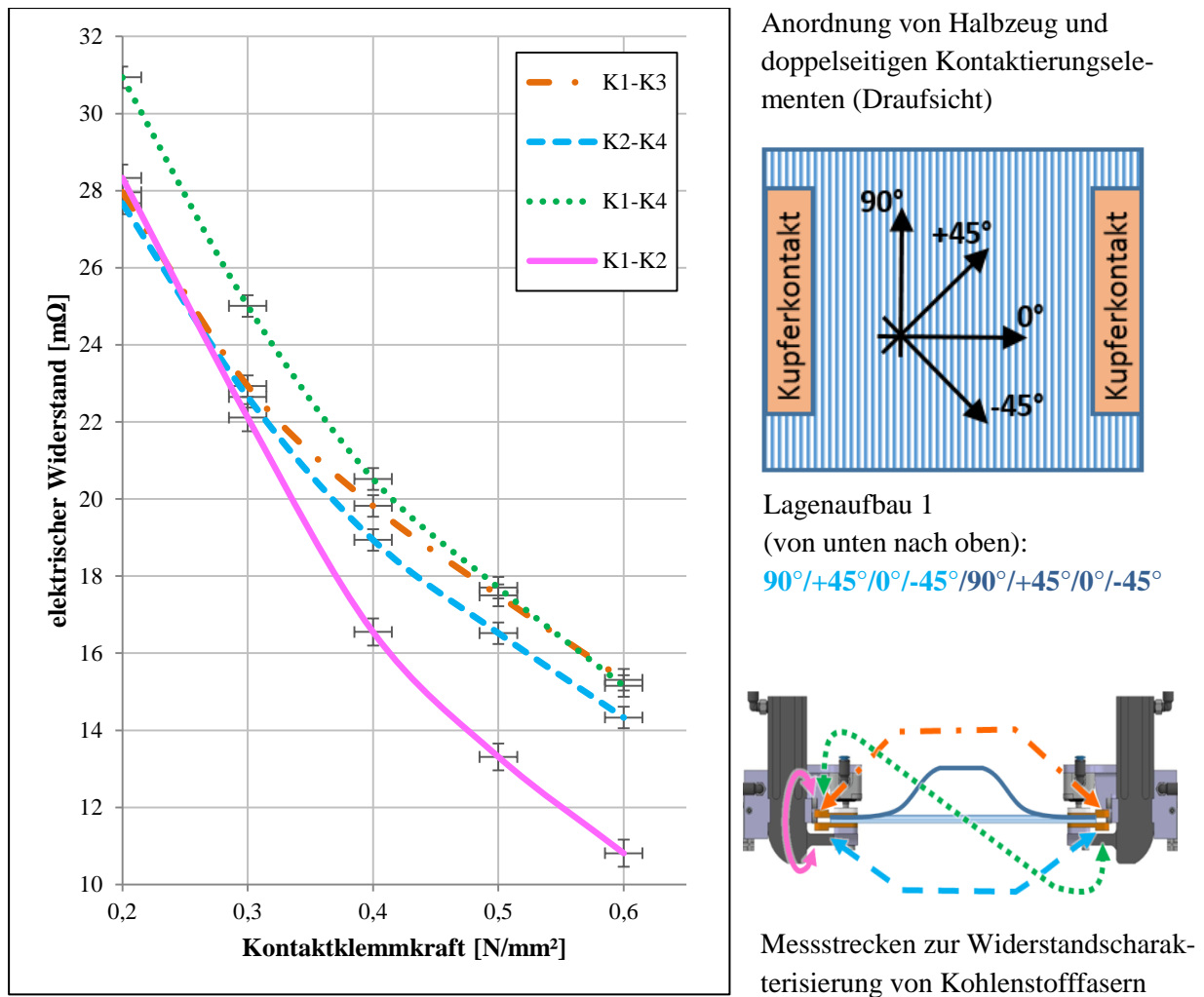


Abbildung 6.2-5: Widerstandscharakteristik für Stringergeometrie mit dem Lagenaufbau 1

Die in der Grafik in Abbildung 6.2-5 dargestellten Kurvenverläufe zeigen den in Kapitel 4.5 erklärten Einfluss der Kontaktkraft auf den Übergangswiderstand. Zudem ist erkennbar, dass die Messstrecken K1–K3 und K2–K4 relativ gleich verlaufen, wenn die unterschiedlichen Streckenlängen auf den spezifischen Widerstand umgerechnet und die Toleranzen berücksichtigt werden. Die Messstrecke K1–K4 zeigt gegenüber den parallelen Verläufen eine leicht erhöhte Widerstandskennlinie bei nahezu identischer Messlänge, was auf eine niedrigere elektrische Leitfähigkeit quer zur Faserrichtung hindeutet. Die rein quer zur Faserrichtung ermittelte Kurve aus K1–K2 zeigt die niedrigste Kennlinie. Normiert auf den spezifischen Widerstandswert liegt der gemessene elektrische Widerstand quer zur Faser um den Faktor 100 über dem Widerstand längs zur Faser.

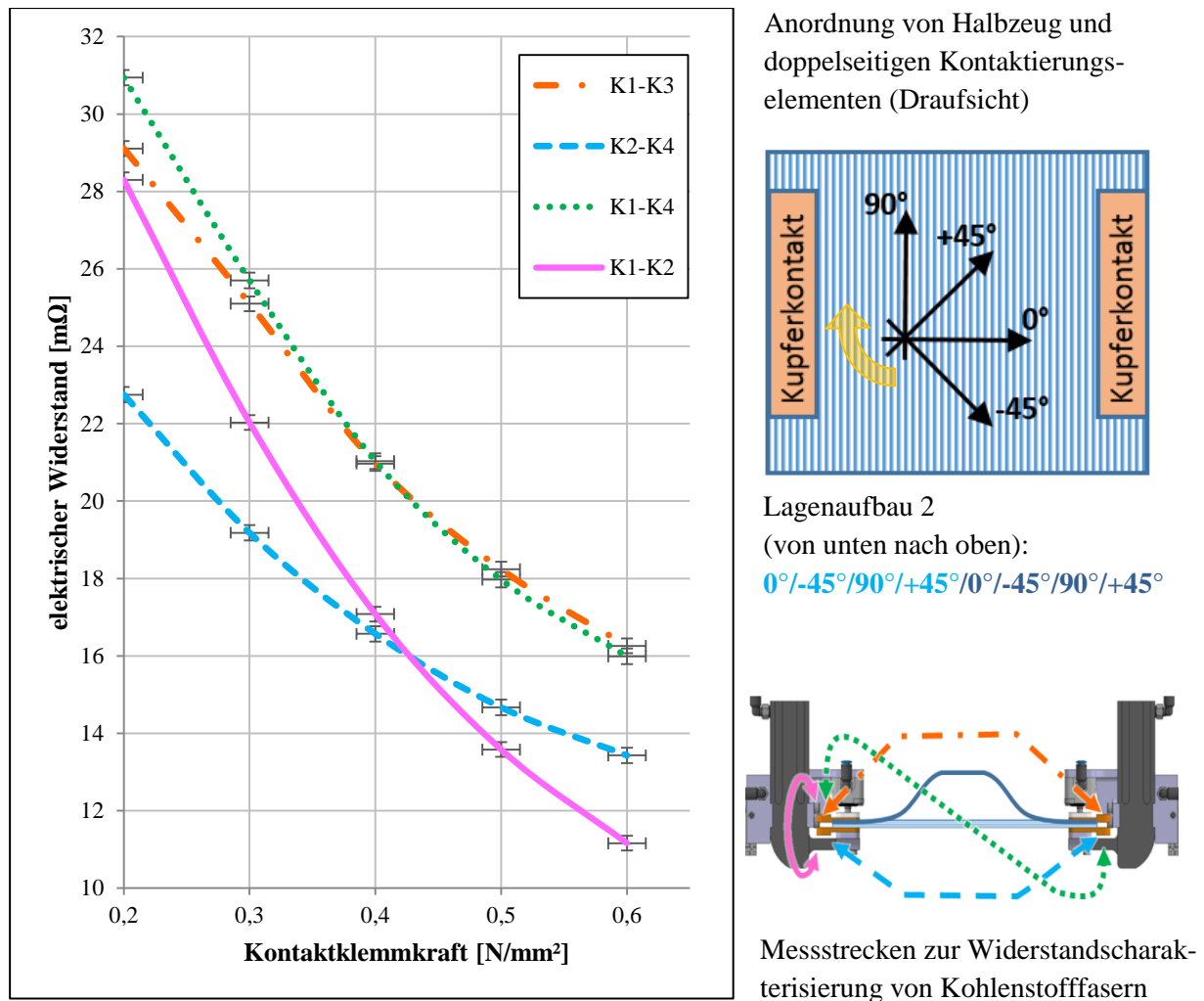


Abbildung 6.2-6: Widerstandscharakteristik für Stringergeometrie mit dem Lagenaufbau 2

Der um 90° gedrehte Lagenaufbau 2 (vgl. Abbildung 6.2-6) zeigt bei der Messstrecke K1–K4 sowie K1–K2 keinen Einfluss auf die Widerstandskennlinienverläufe, da primär die Leitung quer zur Faser detektiert wird und sich die Anzahl der Lagen nicht verändert hat. Die Messstrecke K1–K3 zeigt einen leicht erhöhten Widerstand, was auf die höhere Anzahl an Überdeckung der 0°-Lage von anders orientierten Lagen zur gemessenen Kontaktfläche herrührt. Die Messstrecke K2–K4 trifft direkt auf eine 0°-Faserlage, was den niedrigen Widerstandsmesswert erklärt. Die nachstehenden Tabelle 6.2-1 und Tabelle 6.2-2 zeigen die im Versuch ermittelten spezifischen Widerstandswerte und den deutlichen Unterschied der elektrischen Leiteigenschaften längs und quer zur Kohlenstofffaserachse.



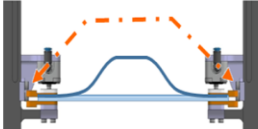
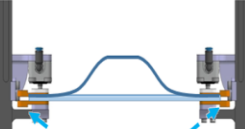
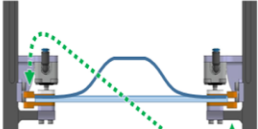
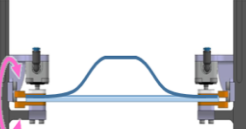
<b>Lagenaufbau</b> (von unten nach oben) <b>90°/+45°/0°/ -45°/90°/ +45°/0°/-45°</b>	<b>Messstrecke K1-K3</b>		<b>Messstrecke K2-K4</b>		<b>Messstrecke K1-K4</b>		<b>Messstrecke K1-K2</b>		
									
	<b>Kontaktkraft</b>	<b>spez. <math>\Omega</math> K1-K3</b>	<b>Fehler <math>\sigma_m</math></b>	<b>spez. <math>\Omega</math> K2-K4</b>	<b>Fehler <math>\sigma_m</math></b>	<b>spez. <math>\Omega</math> K1-K4</b>	<b>Fehler <math>\sigma_m</math></b>	<b>spez. <math>\Omega</math> K1-K2</b>	<b>Fehler <math>\sigma_m</math></b>
	0,2 N/mm <sup>2</sup>	1,303E-05 $\Omega m$	2,5E-07 $\Omega m$	1,289E-05 $\Omega m$	3,6E-07 $\Omega m$	1,441E-05 $\Omega m$	4,1E-07 $\Omega m$	2,011E-03 $\Omega m$	7,7E-05 $\Omega m$
	0,3 N/mm <sup>2</sup>	1,068E-05 $\Omega m$	3,0E-07 $\Omega m$	1,055E-05 $\Omega m$	3,1E-07 $\Omega m$	1,169E-05 $\Omega m$	3,8E-07 $\Omega m$	1,570E-03 $\Omega m$	5,9E-05 $\Omega m$
	0,4 N/mm <sup>2</sup>	9,235E-06 $\Omega m$	2,5E-07 $\Omega m$	8,825E-06 $\Omega m$	2,5E-07 $\Omega m$	9,510E-06 $\Omega m$	2,8E-07 $\Omega m$	1,175E-03 $\Omega m$	3,9E-05 $\Omega m$
0,5 N/mm <sup>2</sup>	8,154E-06 $\Omega m$	2,1E-07 $\Omega m$	7,697E-06 $\Omega m$	2,3E-07 $\Omega m$	8,201E-06 $\Omega m$	2,4E-07 $\Omega m$	9,450E-04 $\Omega m$	3,6E-05 $\Omega m$	
0,6 N/mm <sup>2</sup>	7,134E-06 $\Omega m$	2,1E-07 $\Omega m$	6,677E-06 $\Omega m$	2,6E-07 $\Omega m$	7,096E-06 $\Omega m$	2,9E-07 $\Omega m$	7,675E-04 $\Omega m$	3,4E-05 $\Omega m$	

Tabelle 6.2-1: Experimentell ermittelter spezifischer elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von Faserorientierung und Kontaktierungskraft für Lagenaufbau 1

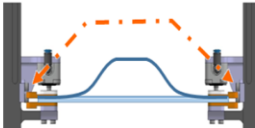
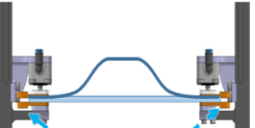
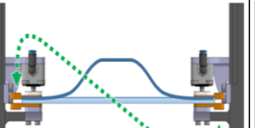
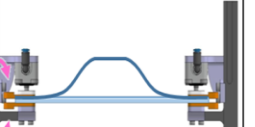
Lagenaufbau (von unten nach oben) 0°/-45°/90°/ +45°/0°/ -45°/90°/+45°	Messstrecke K1-K3			Messstrecke K2-K4		Messstrecke K1-K4		Messstrecke K1-K2	
									
	Kontaktkraft	spez. $\Omega$ K1-K3	Fehler $\sigma_m$	spez. $\Omega$ K2-K4	Fehler $\sigma_m$	spez. $\Omega$ K1-K4	Fehler $\sigma_m$	spez. $\Omega$ K1-K2	Fehler $\sigma_m$
	0,2 N/mm <sup>2</sup>	1,356E-05 $\Omega m$	1,9E-07 $\Omega m$	1,060E-05 $\Omega m$	2,2E-07 $\Omega m$	1,441E-05 $\Omega m$	3,2E-07 $\Omega m$	2,009E-03 $\Omega m$	3,5E-05 $\Omega m$
	0,3 N/mm <sup>2</sup>	1,170E-05 $\Omega m$	2,5E-07 $\Omega m$	8,937E-06 $\Omega m$	2,0E-07 $\Omega m$	1,193E-05 $\Omega m$	2,5E-07 $\Omega m$	1,564E-03 $\Omega m$	3,3E-05 $\Omega m$
	0,4 N/mm <sup>2</sup>	9,771E-06 $\Omega m$	2,1E-07 $\Omega m$	7,721E-06 $\Omega m$	1,5E-07 $\Omega m$	9,775E-06 $\Omega m$	1,9E-07 $\Omega m$	1,213E-03 $\Omega m$	2,5E-05 $\Omega m$
	0,5 N/mm <sup>2</sup>	8,499E-06 $\Omega m$	1,5E-07 $\Omega m$	6,835E-06 $\Omega m$	1,2E-07 $\Omega m$	8,396E-06 $\Omega m$	1,6E-07 $\Omega m$	9,642E-04 $\Omega m$	1,8E-05 $\Omega m$
0,6 N/mm <sup>2</sup>	7,576E-06 $\Omega m$	1,3E-07 $\Omega m$	6,258E-06 $\Omega m$	1,1E-07 $\Omega m$	7,441E-06 $\Omega m$	1,3E-07 $\Omega m$	7,924E-04 $\Omega m$	1,2E-05 $\Omega m$	

Tabelle 6.2-2: Experimentell ermittelter spezifischer elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von Faserorientierung und Kontaktierungskraft für Lagenaufbau 2

Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass durch die beidseitige Kontaktierung die elektrischen Widerstände gemessen und damit Rückschlüsse auf den kontaktierten Lagenaufbau gezogen werden können. Dies kann zur Qualitätskontrolle in der Produktion genutzt werden. Für biegeschlaife Halbzeuge hat sich für nachfolgende Versuche ein Kontaktierungsdruck von 0,3 N/mm<sup>2</sup> und für starre Organobleche ein Kontaktierungsdruck von 1,4 N/mm<sup>2</sup> als praktikables Mittelmaß aus konstruktivem Aufwand und Nutzen herauskristallisiert. Die benötigte größere Kontaktkraft für Organobleche lässt sich mit der schwereren Verformung des Halbzeuges zur Einebnung und damit Erhöhung der Wirkfläche erklären.

### 6.3 Wärmeeinfluss auf elektrische Leiteigenschaften

Versuche zur Detektion der elektrischen Leiteigenschaften von Kohlenstofffasern in Abhängigkeit der Faserachsenorientierung haben dessen Einfluss zur gemessenen Stromflussstrecke bei Raumtemperatur deutlich herausgestellt (vgl. Kapitel 6.2 *Elektrodenkonfiguration*). Um das Widerstandsverhalten der Fasern bei Wärmeeinfluss zu ermitteln, werden Trockenfaserrovings (Tenax HTS 6 K, vgl. Datenblatt Anhang 13.3) in identischer Einspannung über eine Heizquelle aufgewärmt, während die Oberflächentemperatur mittels einer Infrarotkamera (ThermoVision™ A40-M) aufgenommen wird. Die zur Reduktion des Übergangswiderstandes stirnseitig jeweils mit Silberleitpaste (CircuitWorks CW7100) bestrichenen Kohlenstofffasern [112] werden längs der Faserachse mit einer Länge von 400 mm auf der Heizplatte abgelegt. Die Widerstandsmessung erfolgt simultan zur Temperaturmessung mittels eines Milliohmmeters (PEAKTECH 2705-2). Von den ermittelten Werten sind vier charakteristische Kennlinien der temperaturbezogenen Leiteigenschaften in der folgenden Abbildung 6.3-1 dargestellt.

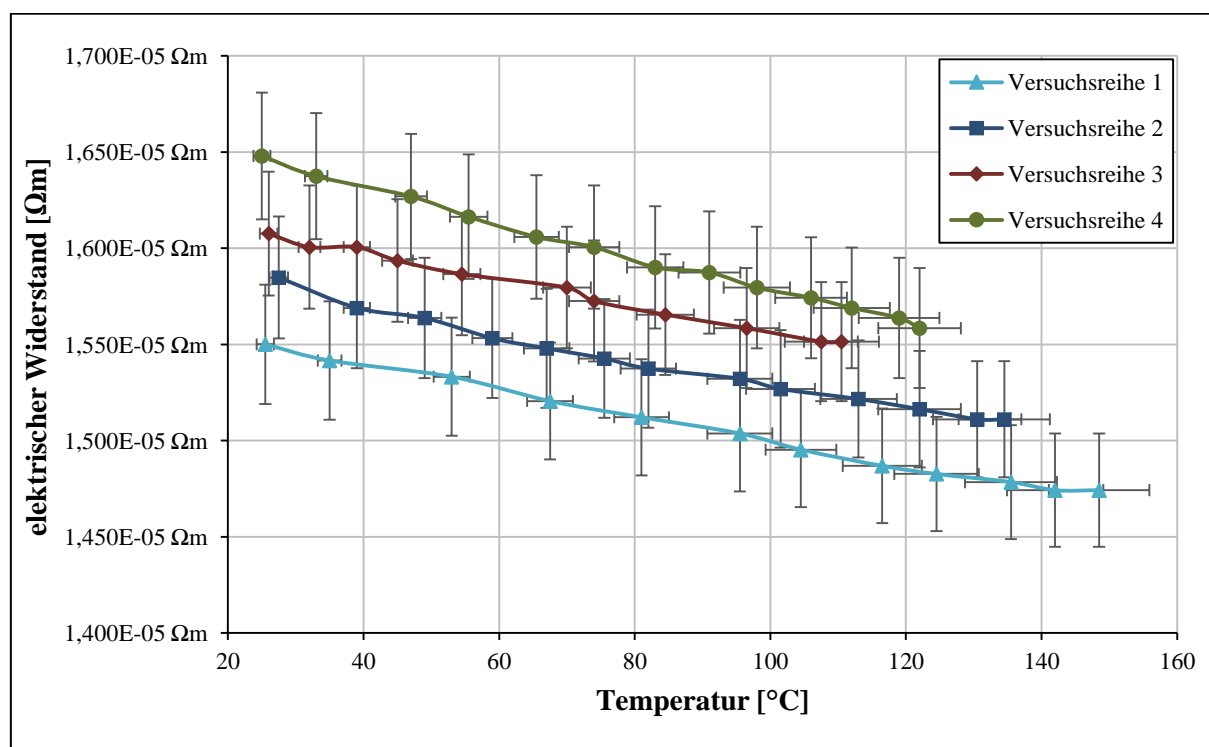


Abbildung 6.3-1: Widerstandswerte von HTS-Trockenfasern in Abhängigkeit zu ihrer Temperatur

Die Messwerte zeigen in ihrer Tendenz jeweils eine deutlich verbesserte Leiteigenschaft bei höheren Temperaturen und somit ein NTC-Verhalten (negative temperature coefficient thermistors). Die Differenzen der Kurvenverläufe zueinander lassen sich durch Messfehler, Materialunstetigkeiten, Präparationsfehler der Probenkörper und durch Kontaktierungsinhomogenitäten erklären. Für die Nutzung der aufgenommenen Wider-

standswerte des Halbzeuges während einer Temperierung sollte demzufolge die Änderung des Widerstandsverlaufes beachtet werden. Der temperaturabhängige Widerstand  $R_H$  bei einer Betriebstemperatur  $T$  errechnet sich aus dem Nennwiderstand  $R_N$  bei einer Nenntemperatur  $T_N$  sowie eine Materialkonstante  $b$  wie folgt:

$$R_H = R_N \cdot e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}\right)} \quad (6-1)$$

Mit der Materialkonstante  $b$  ergibt sich aus dem Verhältnis von der Aktivierungsenergie  $E_A$  und der Boltzmannkonstante  $k_B$  folgende Gleichung:

$$b = \frac{E_A}{k_B} \quad (6-2)$$

Kohlenstofffasern zählen demzufolge zu den Heißeleitern, was bei ihrer beabsichtigten Nutzung zur direkten, homogenen Wärmeerzeugung bezüglich der notwendigen Regelung, beachtet werden muss. Werden Kohlefasern mit einem konstanten Strom angesteuert, sinkt die Wärmeleistung  $P$  während der Erwärmung des Halbzeuges durch die Verringerung dessen Widerstandes  $R$  infolge des NTC-Verhaltens:

$$P = R \cdot I^2 \quad (6-3)$$

Wird ein Direktbestromungsaufbau von Kohlenstofffaserhalbzeugen mit einer konstanten Spannungsquelle  $U$  betrieben, steigt die Wärmeleistung sukzessive anlässlich der Heißeleitereigenschaft, da der Strom mit sinkendem Widerstand zunimmt:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (6-4)$$

## 6.4 Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern

Damit der Elektronenfluss während einer Direktbestromung eines Kohlenstofffaserhalbzeuges innerhalb eines definierten Lagenaufbaus bestimmt werden kann und um die ersten rudimentären Verhaltensmuster der Fasern aus den vorangehenden Kapiteln 6.1, 6.2, 6.3 zu manifestieren, wird ein eigens dafür entwickelter Versuchsaufbau verwendet.

Hierzu wird das zu untersuchende Halbzeug in eine Stromeinleitungsvorrichtung an den äußersten Stellen definiert zwischen jeweils zwei Kupferelektroden eingespannt. Mit der Kombination einer Stromeinleitungssteuerung wird eine einseitige, doppelseitige oder kreuzweise Bestromung ermöglicht. Dabei werden Kohlenstofffaserrovings (Tenax-HTA-400TEX-6-K-PAN-Fasern mit 1,25 % Epoxidharzschlichte) mit einer jeweiligen Länge von 1 m planar übereinandergelegt und durch eine spezielle Aufnahme zwischen den Kontaktierungspunkten aufgefächert. Zum besseren Verständnis ist der Versuchsstand in nachstehender Abbildung 6.4-1 dargestellt.

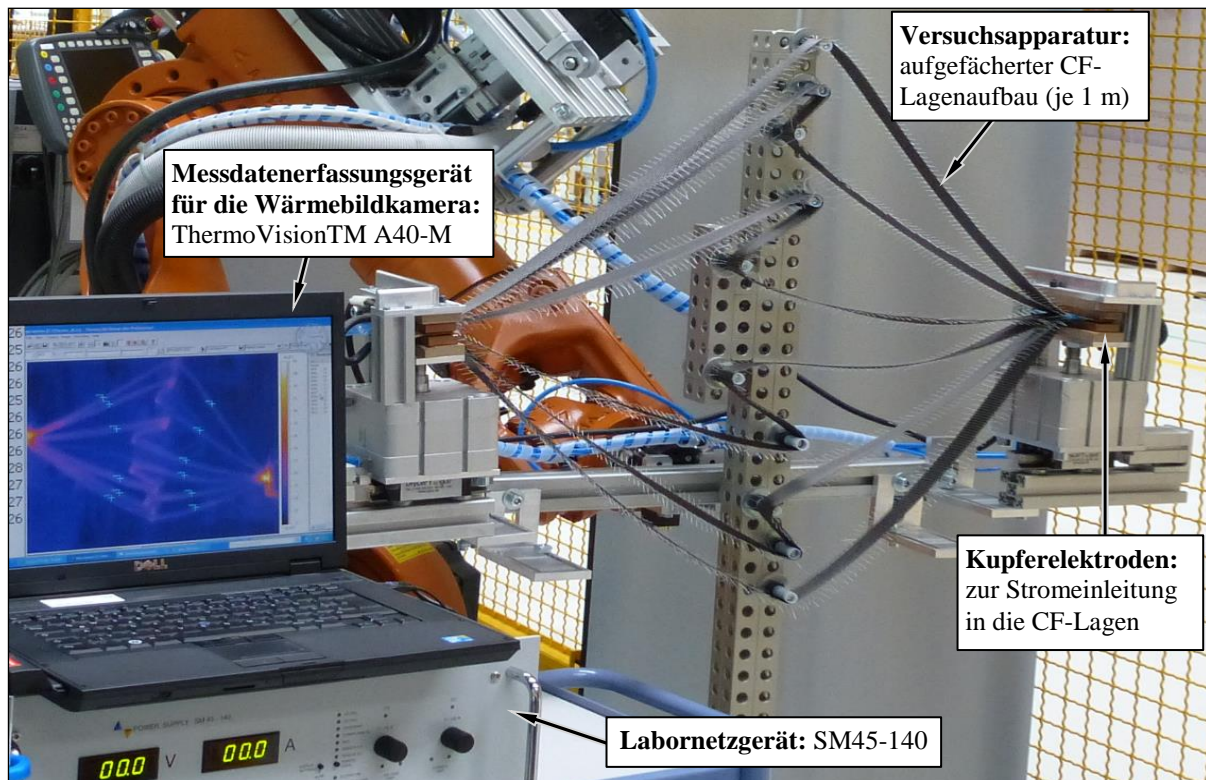


Abbildung 6.4-1: Versuchsstand zur Bestimmung der Wärmeverteilung innerhalb eines CF-Lagenaufbaus

Die thermisch gedämmten und elektrisch isolierten Aufnahmestifte des Aufspreizgestells halten die Faserlagen einer jeden Lage derart auseinander, dass eine Berührung dieser untereinander ausgeschlossen und die jeweilige Strecke entlang der Fasern einer Lage von Plus- zum Minuspol äquivalent ist. Durch die Auffächerung des Lagenaufbaus wird eine diskrete Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera (ThermoVisionTM A40-M) mit minimierten Wärmeübertragungsmechanismen in der Kontaktierungszone quer zur Faserachse möglich. Die geometrische Auffächerung des Lagenaufbaus zwischen den beiden Bestromungskontakten ist in Abbildung 6.4-3 mit den jeweiligen Abständen in mm dargestellt.

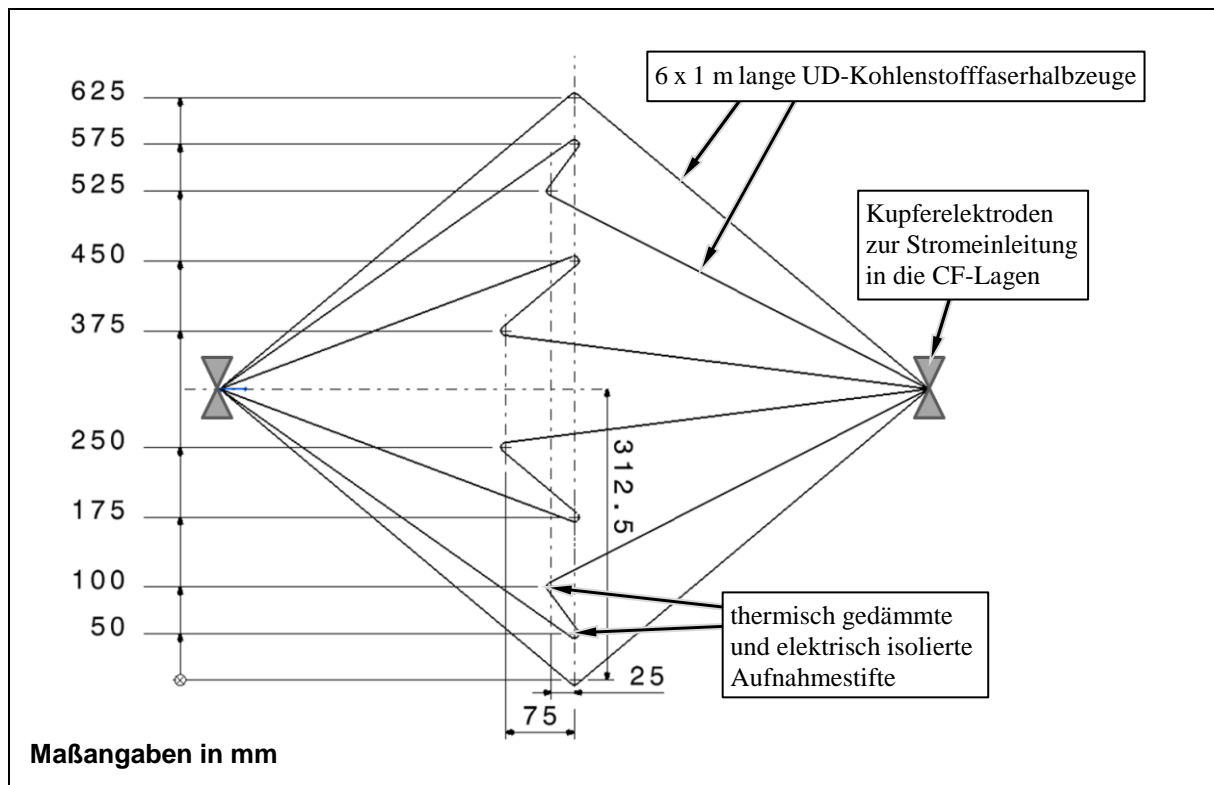


Abbildung 6.4-2: Schematische Darstellung der definierten Aufnahmepunkte des Aufspreizgestells

Die verwendeten Elektroden haben eine Kontaktfläche von je 3.000 mm<sup>2</sup> und sind aus Kupfer (Cu-DHP) gefertigt. Wenn eine Spannung an den beidseitig anliegenden Elektroden des Probekörpers initiiert wird (vgl. Abbildung 6.4-3 (links)), zeigt das resultierende Wärmebild eine symmetrisch von außen nach innen abnehmende Erwärmung der Fasern, wie in Abbildung 6.4-3 (rechts) dargestellt.

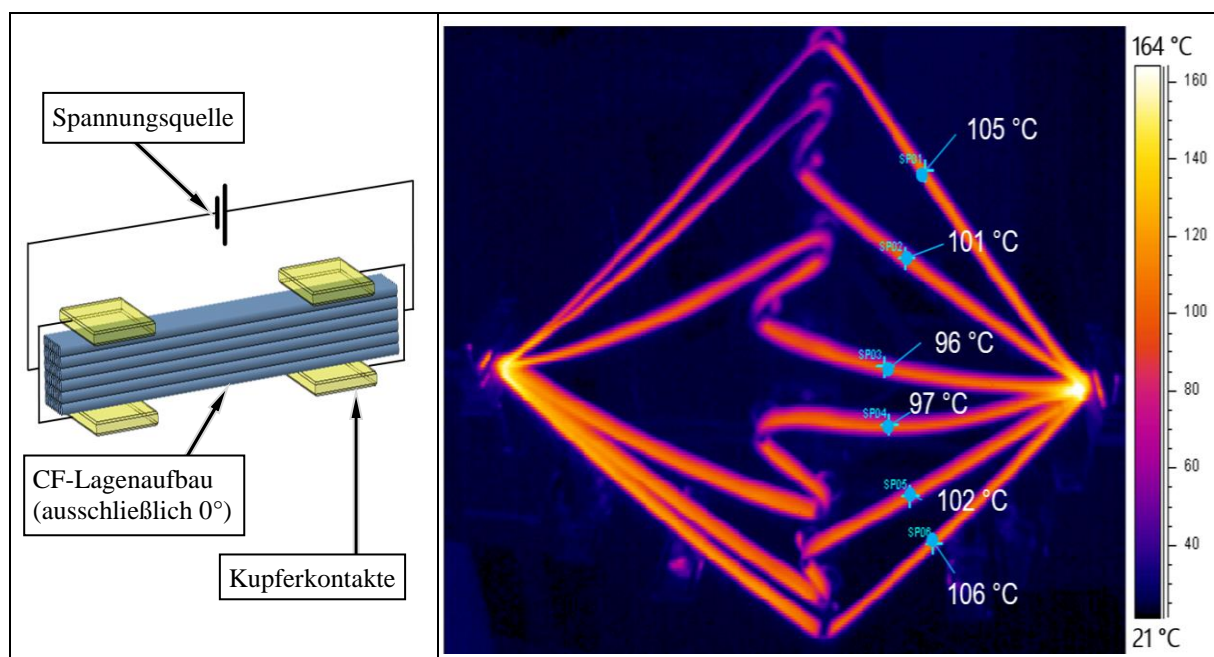


Abbildung 6.4-3: Kontaktierungsskizze einer doppelseitigen Bestromung (links) und die sich ergebende Wärmeverteilung von 6 UD-Lagen bei doppelseitiger Bestromung (rechts)



Das Kohlenstofffaserhalbzeug reagiert auf die Stromzufuhr in den praktischen Versuchen, wie theoretisch bereits in Kapitel 4.3 vorausgesagt wurde, und deckt sich mit erhöhten, spezifischen Widerstandsmessungen quer zur Faserrichtung (vgl. Kapitel 6.4 *Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern*). In diesem Versuchsaufbau ist sehr gut zu erkennen, dass mit der direkten Stromeinleitung in die CF-Halbzeuge eine relativ homogene Erwärmung auch in Tiefenrichtung unabhängig vom Kompaktierungsgrad der CF-Lagen zueinander möglich ist. Der für herkömmliche Kompaktierungsvorgänge zu dessen Beschleunigung ratsame Vakuumaufbau oder die Verwendung einer Doppelheizpresse werden somit für diese endlosfaserverstärkten Halbzeuge überflüssig.

Im Folgenden wird lediglich über die beiden unteren Kontakte Strom in einer Ebene in die gegenüberliegende Kontaktzone in das Halbzeug eingeleitet, um detailliertere Messdaten je Versuchsprobe bezüglich der Detektion der inneren Wärmeverteilung für dieses Verfahren zu generieren. Dadurch wird die effektive Messstrecke in Dickenrichtung des Probenkörpers bezüglich Wärmeentwicklung verdoppelt. Zusätzlich werden um 90° in der Ebene gedrehte UD-Faserzuschnitte zwischen den als Widerstandsheizung fungierenden Halbzeugen im Bereich der Kontaktierungszone eingebracht, um den messbaren Tiefeneffekt bezüglich der Leiteigenschaften quer zur Faserachse zu vergrößern (vgl. Abbildung 6.4-4 (links)).

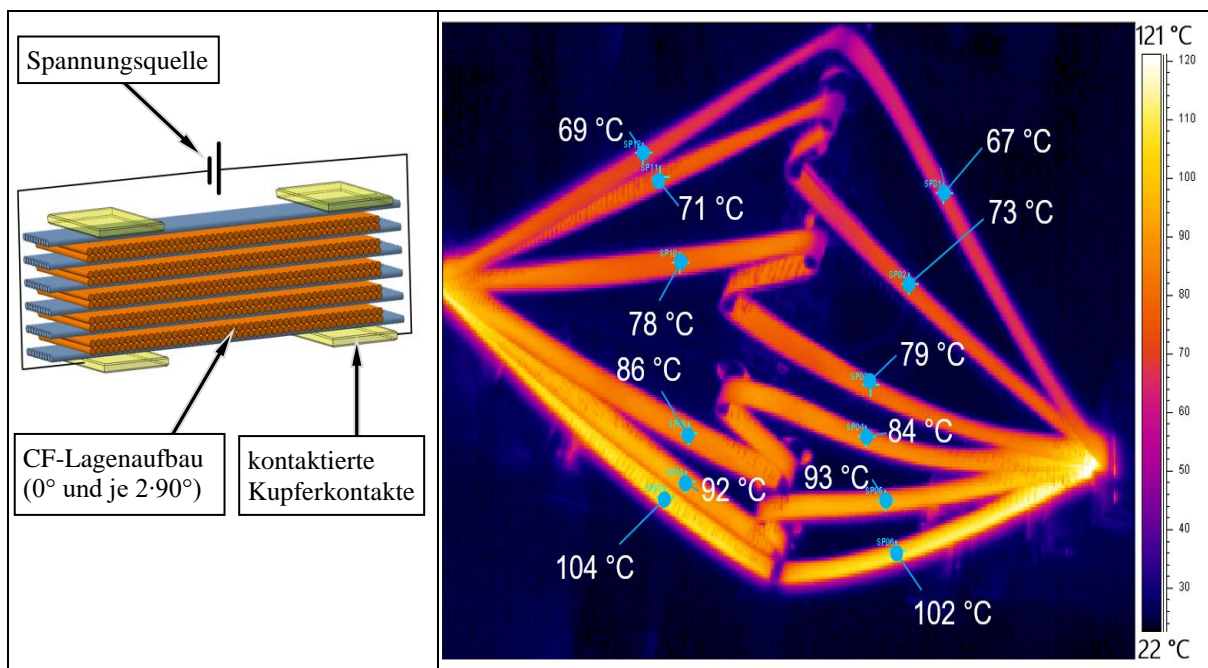


Abbildung 6.4-4: Kontaktierungsskizze einer unterseitigen Bestromung (links) und Wärmeverteilung bei unterseitiger Bestromung mit jeweils zusätzlichen 2 x 90°-CF-Zwischenlagen (rechts)

Das sich einstellende Wärmebild in Abbildung 6.4-4 (rechts) zeigt am Beispiel einer Momentaufnahme eines mit 40 A bestromtes Halbzeuges die mit steigender Lagenzahl zu erwartende reduzierte Temperaturerhöhung; zugleich visualisiert die Darstellung die

theoretisch ermittelten schlechteren elektrischen Leiteigenschaften der Kohlenstofffasern quer zu dessen Faserachse. Werden die registrierten Temperaturänderungen aus den Versuchen über die Zeit aufgetragen, verdeutlichen dessen Kurvenverläufe (vgl. Abbildung 6.4-5) die effektive Aufheizung von trockenen Kohlenstofffaserhalbzeugen mittels Widerstandsheizung, sowohl in Faserlängs- als auch in Faserquerrichtung.

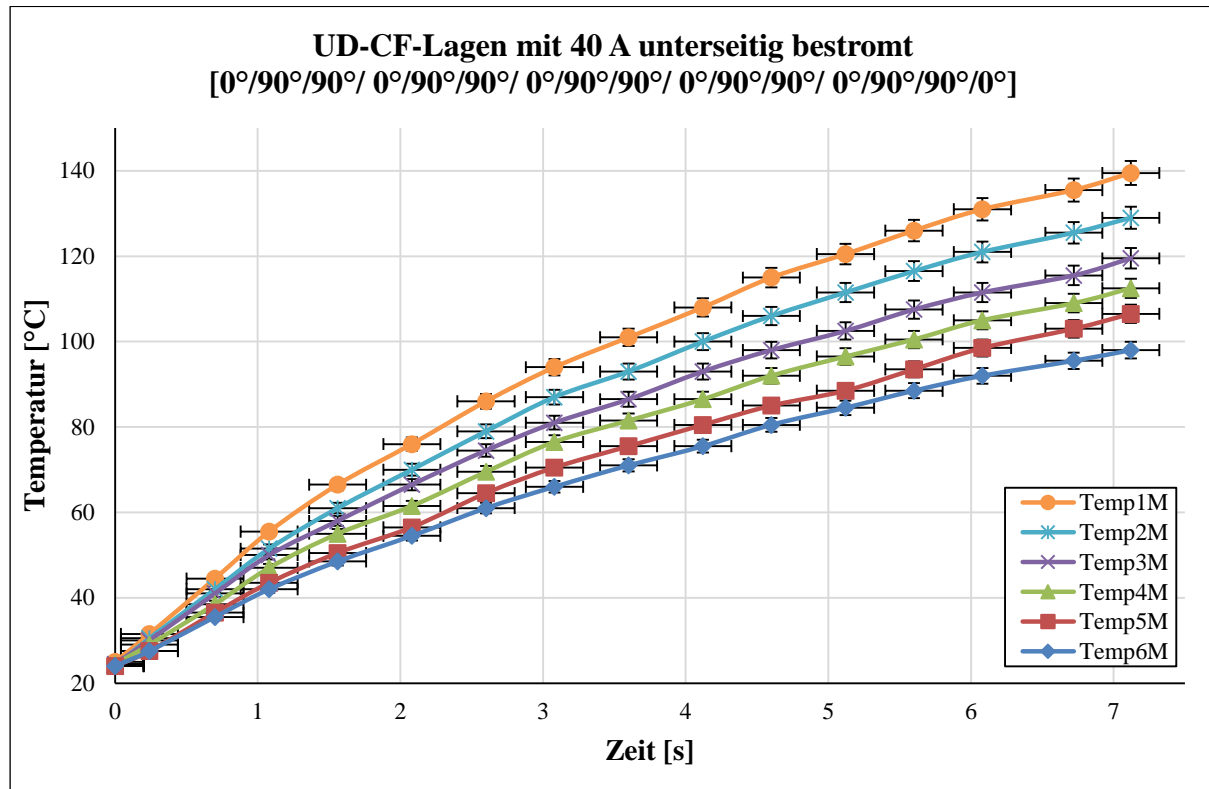


Abbildung 6.4-5: Erwärmungsverläufe von 0°-Faserlagen eines 16-lagigen Kohlenstofffaserhalbzeugs

Die aufgenommenen Temperaturen der 6 x 0°-Lagen zeigen ein von der Kontaktierungszone ausgehend abnehmendes Niveau, was mit dem erhöhten Widerstand mit aufsteigender Lagenzahl zusammenhängt. Die aus zwei Messpunkten je 0°-UD-Faserlage gemittelten Temperaturmesswerte in der nachfolgenden Abbildung 6.4-5 zeigen mit Temp1M das Erwärmungsverhalten einer direkt an der Kupferkontaktleiste anliegenden Kohlenstofffaserlage. Die nachfolgenden Kurvenverläufe von Temp2M bis Temp6M spiegeln die suggestiv abnehmende Temperaturentwicklung durch zunehmenden Widerstand in Faserquerrichtung wider.

Die maximale Aufheizrate bei identischem Versuchsaufbau jedoch ohne 90°-Lagen wird bei dem höchsten eingestellten Strom von 50 A erzielt, wobei eine Temperaturdifferenz des Halbzeugs zur Ausgangstemperatur von 100 K innerhalb von nur 3,88 s erreicht wird. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.4-6 zu sehen.

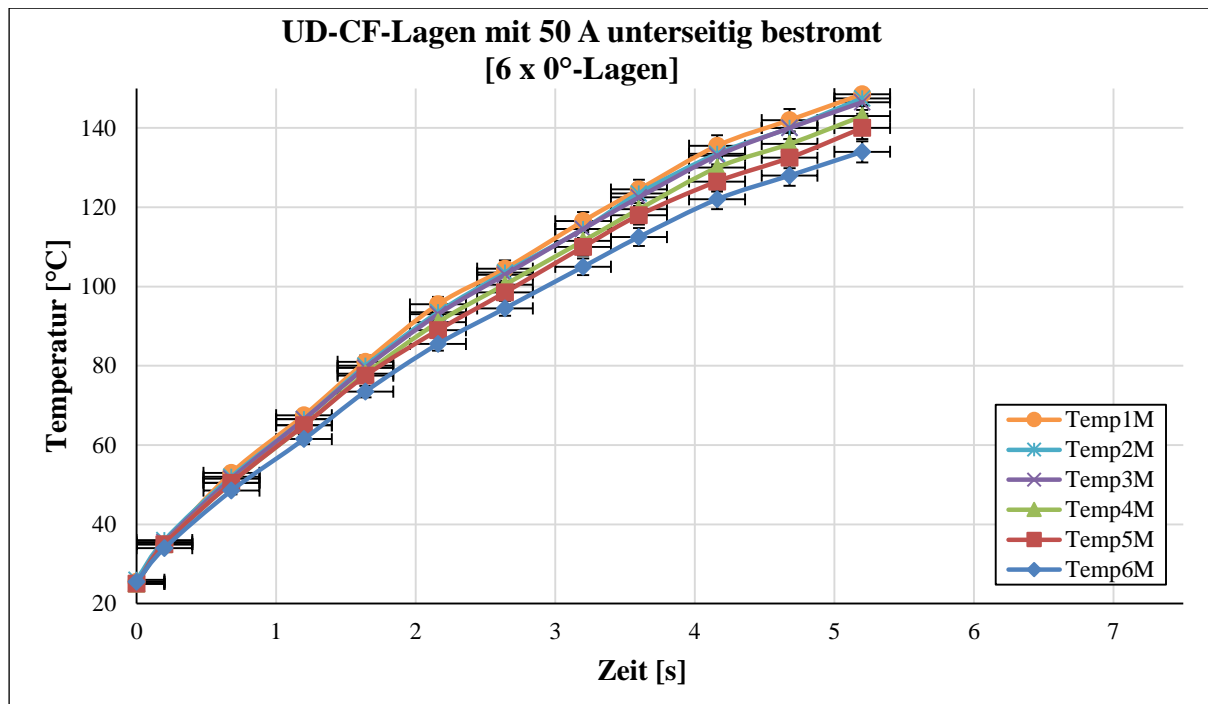


Abbildung 6.4-6: Erwärmungsverläufe von 0°-Faserlagen eines 6-lagigen Kohlenstofffaserhalbzeugs

Beim Vergleich von 26 Messreihen mit identischem Fasermaterial und variierenden Lagenaufbau sowie unterschiedlich eingeleiteten Stromwerten sind neben unterschiedlichen Aufheizraten auch unterschiedliche Temperaturverluste der durchgängigen 0°-Kohlenstofffaserlagen je Halbzeug zu beobachten. In der folgenden Abbildung 6.4-7 sind diese festgestellten Abhängigkeiten grafisch dargestellt.

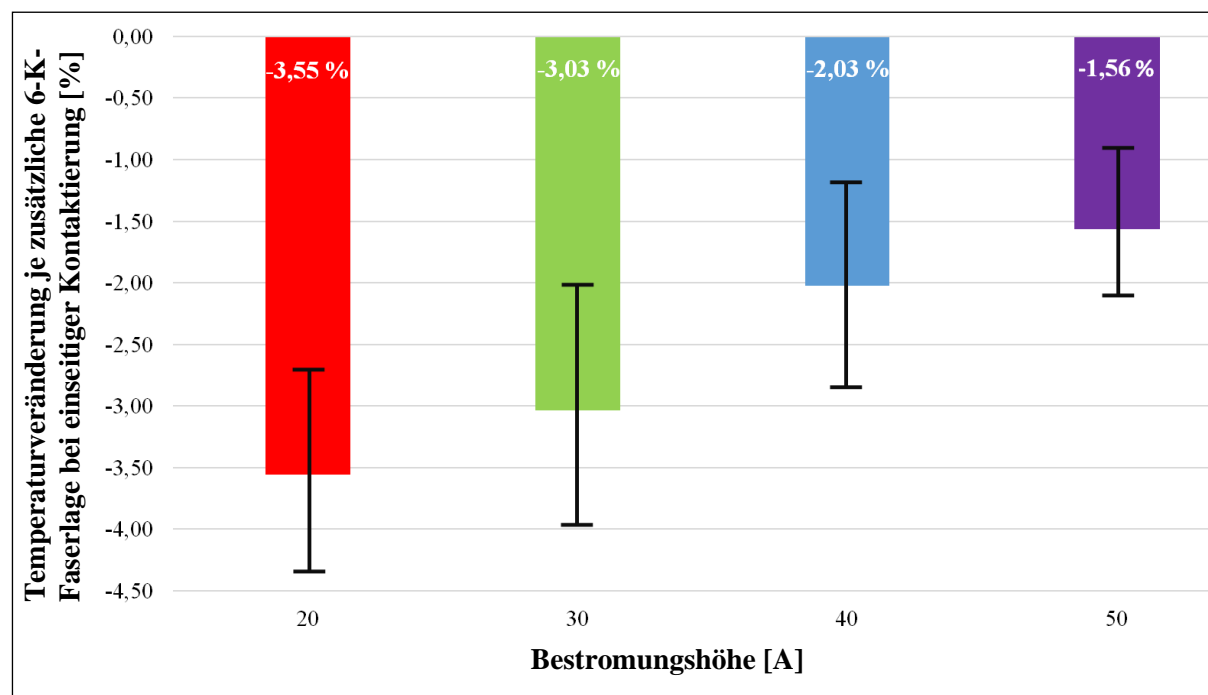


Abbildung 6.4-7: Abhängigkeit der Temperaturverteilung von übereinanderliegenden CF-Lagen zur eingeleiteten Stromstärke



Da die Temperaturentwicklung der gestapelten Faserlagen prozentual in Abhängigkeit von der initiierten Stromstärke – von niedrigen bis höheren Temperaturstadien– zeitkonstant den aufgelisteten Faktoren entspricht, kann von einer entsprechenden Abhängigkeit ausgegangen werden. Zu erklären ist dieses Phänomen durch die Kombination von orthotrop elektrisch leitfähigen, dünnfaserigen Probenmaterial mit demgegenüber sehr hoher eingeleiteter Stromstärke, wodurch die Durchleitung quer zur Faserrichtung, aufgrund der beträchtlichen Stromdichte, zusätzlich begünstigt wird. Der Strompfad bildet sich demzufolge nicht nur über die Kohlenstofffasern nahe der Elektroden, sondern auch in den vom Stromeinleitungspunkt gesehenen tieferen Laminatschichten. Die Höhe der Stromstärke verstärkt somit den Effekt der Durchleitung quer zur Faserachse und reduziert gleichzeitig die entstehenden Verluste. Die Bestromung der Kohlenstofffasern erzeugt eine Erwärmung primär an den Anlageflächen zur Kupferelektrode.

Aus diesem Grund wird ein identischer Versuchsaufbau zu Abbildung 6.4-1 aufgebaut, mit dem Unterschied, dass eine Heizplatte als untere Kontaktierungsfläche dient. Auf diese Weise soll der Einfluss der entstehenden Temperaturerhöhung, der durch den Übergangswiderstand in den Kontaktierungszonen hervorgerufen wird, auf die gezeigte Temperaturverteilung untersucht werden. Die Kohlenstofffasern werden ohne Aktivierung des Widerstandheizmechanismus mit identischem Druck an die Heizplatte gedrückt, während diese auf 160 °C erhitzt und die dadurch hervorgerufene Temperaturentwicklung der Kohlenstofffasern mittels Wärmebildkamera aufgezeichnet wird. Der Pressstempel wird gegenüber den Kohlenstofffasern mit einer 4,5 mm dicken thermischen Dämmschicht, basierend auf hochverdichteten Magnesiumsilikaten (BRA-BEBOARD® HT 175) mit einer Wärmeleitzahl von 0,22 W/mK, gedämmt. Die aktuelle Temperatur der Heizplatte wird durch Temperatursensoren detektiert, die sich zwischen der ersten CF-Lage und der Oberfläche der Heizplatte befinden. Ein Foto des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 6.4-8 (links) zu sehen.

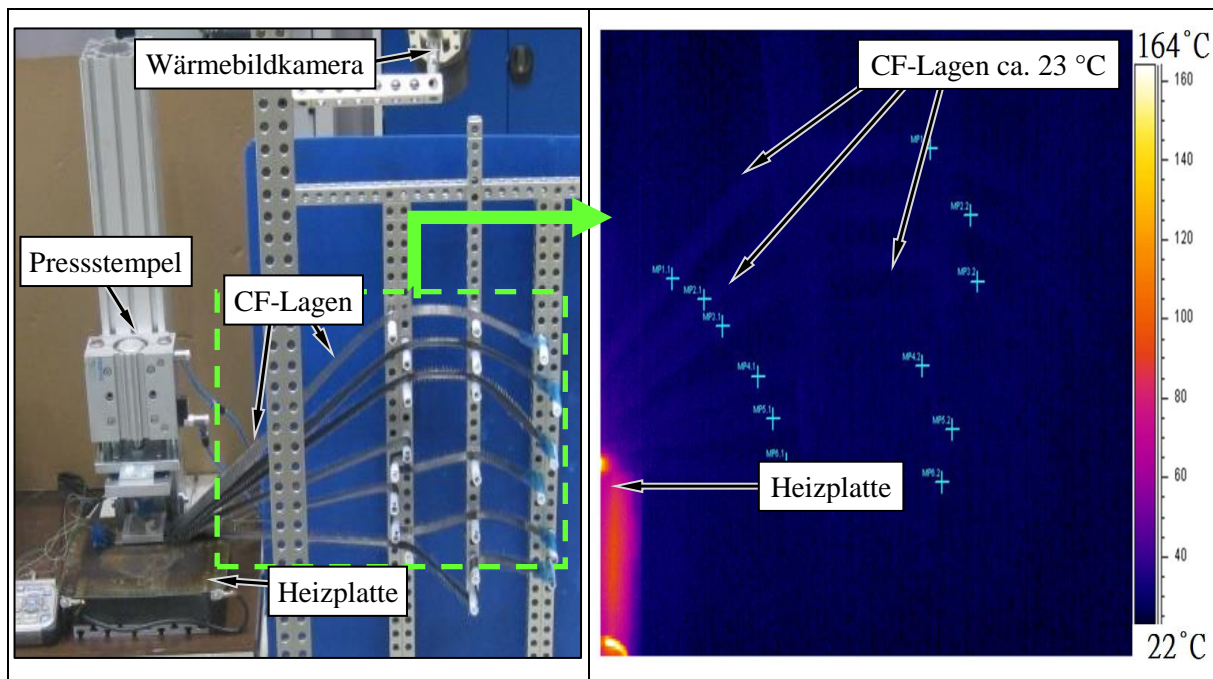


Abbildung 6.4-8: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitung von CF-Lagen (links) und Wärmebild von CF-Lagen, die auf eine 160 °C warme Heizplatte angedrückt werden (rechts)

Das sich nach einer 20-minütigen Kontakterwärmung der Kohlenstofffasern bei 160 °C einstellende Wärmebild ist in Abbildung 6.4-8 (rechts) dargestellt. Eine merkliche Temperaturerhöhung der Fasern ist nach einer Haltezeit von 20 min bei konstanten 160 °C in einem Messabstand von 50 mm von der Heizplatte entfernt nicht zu beobachten. Demzufolge reicht die über die Heizplatte in die Fasern eingeleitete Energie nicht aus, um einen merklichen Beitrag zur Erwärmung des Halbzeuges hinzuzufügen, da die Verluste durch Wärmekonvektion diesen egalisieren. Damit ist gezeigt, dass die erzeugten Temperaturkurven aus den Bestromungsversuchen primär durch die Widerstandserwärmung anstatt über Wärmeleitung generiert werden. Eine signifikante Beeinflussung des erzeugten Wärmebildes durch die entstehende Wärme in den Kontaktzonen, infolge des Übergangswiderstandes von den Elektroden zum Halbzeug, kann somit ausgeschlossen werden.

Bei der konventionellen Erwärmung eines Kohlenstofffaserhalbzeuges mit einer erreichten maximalen Aufheizrate der Heizplatte von 29,2 K/min konnte eine inhomogene Temperaturverteilung von  $8,3 \% \pm 0,7 \%$  zur nächstliegenden Faserlage registriert werden (vgl. Kapitel 6.1 *Thermische Leitfähigkeiten orthogonal zur Faserorientierung*). Mit der direkten Stromeinleitung in die Fasern bei gleichem Fasermaterial und Lagenaufbau können hingegen Aufheizraten von 25,8 K/s erzielt werden. Die Abbildung 6.4-9 zeigt sehr deutlich diesen Unterschied der erzielbaren Aufheizraten der beiden Verfahren.

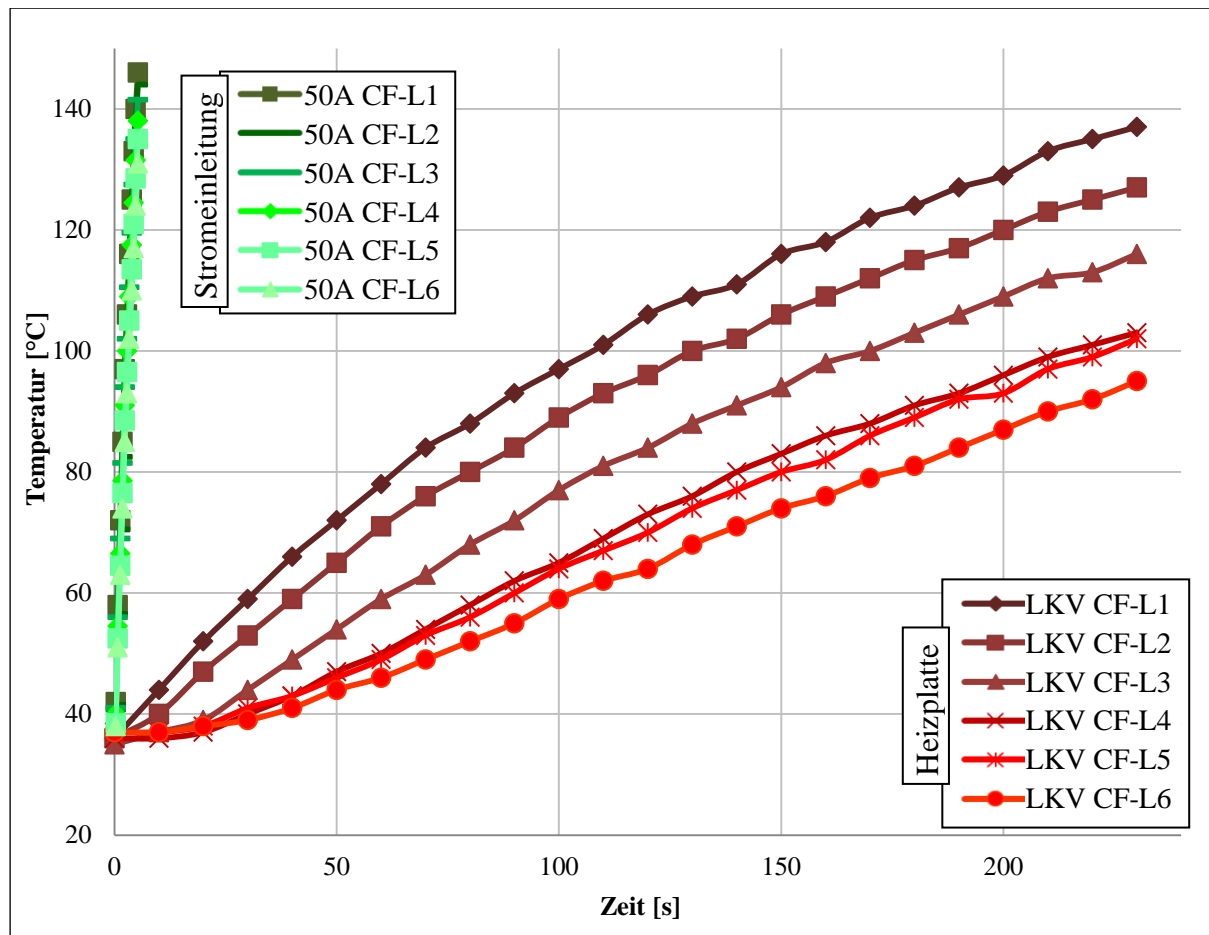


Abbildung 6.4-9: Vergleich der Aufheizraten von identischen CF-Lagenaufbauten mittels einer Heizplatte versus direkte, unterseitige Stromeinleitung mit 50 A

Beim Vergleich dieser Angaben zur Aufheizrate ist zu beachten, dass beim aufgefächerten Versuchsstand wesentlich mehr Leistung durch Konvektion und Strahlung verloren geht, als beim ebenen Aufbau mit der Heizplatte. Demzufolge müsste der Differenzfaktor der möglichen Aufheizraten noch extremer zugunsten der Direktbestromung im Vergleich zur Kontaktheizvariante ausfallen. Die maximalen Aufheizraten der Direktbestromung werden dabei lediglich durch die für die Versuche zur Verfügung stehenden Netzgeräte begrenzt (vgl. Anhang 13.1). Die Temperaturinhomogenität von einer Faserlage zur nächsten konnte dabei auf  $1,56 \% \pm 0,54 \%$  reduziert werden (vgl. Abbildung 6.4-7).

Mit diesem speziellen Versuchsaufbau konnte gezeigt werden, dass selbst großvolumige, komplexe und bis dato als unzugänglich definierte Geometrien mit der Direktbestromung homogen aufgeheizt werden können. Die Verknüpfung dieses Wissens mit einem entsprechenden Fertigungskonzept ermöglicht die Erwärmung von verschlungenen Strukturen und verzweigten Hohlkörpern. Somit sind völlig neue Fertigungsverfahren und Kombinationen mit innovativen Bauteilkonstruktionen denkbar.

## 6.5 Thermische Eigenschaften von Fasermatrix-Verbunden

Ein Ansatz zur Optimierung des CFK-Bauteilherstellungsprozesses bzgl. Produktionskosten- und Prozesszeitreduktion ist die Verwendung von Halbzeugen, die vor der eigentlichen Bauteilgeometriegenerierung bereits mit dem notwendigen Matrixwerkstoff vorkonfektioniert worden sind (vgl. Kapitel 2.3.4 *Verfahren zum Umformen von Organobleche*). Je nach Infiltrationsgüte der Matrix (Porengehalt, Fehlstellen, Risse) sind die Verstärkungsfasern praktisch vollständig von dieser umschlossen und geben die durch Direktbestromung erzeugte Wärme direkt an die umgebende Matrix ab. Die Wärmeübertragung von Kohlenstofffaser zu Kohlenstofffaser erfolgt demnach primär über Wärmeleitung. Bei trockenen Faserhalbzeugen – wie beispielsweise während des Preformprozesse – erfolgt die Wärmeübertragung demgegenüber über ein Mischungsverhältnis von Wärmekonvektion und Wärmeleitung, das stark vom Kompaktierungsgrad abhängt.

Die negative Eigenschaft der eingeschränkten elektrischen Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern orthogonal zur Faserachse wird durch die umgebende Matrix in Hinblick auf ein homogenes Aufheizergebnis in Dickenrichtung größtenteils kompensiert. Ausschlaggebend ist hierbei primär die Wärmeleitfähigkeit des Matrixwerkstoffes. Zu beachten ist, dass die Matrix selbst elektrisch leitend sein kann oder durch Beimengung entsprechender Zusätze (z. B. Rußpartikel) elektrisch leitend wird und zur Widerstandserwärmung beitragen kann (vgl. [16]).

Eine Verhaltenscharakterisierung von thermoplastischen Faserverbundhalbzeugen wird im Folgenden bezüglich des Direktbestromungskonzeptes zwecks Erzeugung der notwendigen Erweichungstemperatur zur Bauteilgeometriegenerierung durch Widerstandsheizungen durchgeführt. Es werden Probenkörper mit Kohlenstofffasergewebe und PPS(Polyphenylensulfid)- sowie PEEK(Polyetheretherketon)-Matrix untersucht. Der spezifische Durchgangswiderstand nahe 23 °C hat bei PPS einen Wert von  $10^{13} \Omega\text{cm}$  und bei PEEK  $>10^{14} \Omega\text{cm}$ . Der spezifische Oberflächenwiderstand<sup>1</sup> beträgt bei PPS  $10^{15} \Omega/\text{sq}$  und bei PEEK  $>10^{13} \Omega/\text{sq}$  [113]. Die Testkörper (vgl. Anhang 13.4 *Prüfkörper: Kohlenstofffasergewebe in Thermoplastmatrix*) werden beidseitig zwischen ebenen Kupferkontaktleisten (je 100 mm x 30 mm Grundfläche) mit 1,4 N/mm<sup>2</sup> eingespannt. Der Abstand der Kontaktklemmen ergibt die Bestromungsstrecke und beträgt bei diesen Versuchen 200 mm. Die Proben werden mit Gleichstrom in variabler Stärke beaufschlagt, während die Temperaturentwicklung sowie der innere

---

<sup>1</sup> Der spezifische Oberflächenwiderstand wird mit der Maßeinheit  $\Omega/\text{sq}$  (Ohm/Fläche) angegeben, um mit dem zusätzlichen Zeichen auf die flächenbezogene Größe hinzuweisen [114].

elektrische Leitungswiderstand der Probe synchron aufgezeichnet werden. Der Aufbau samt Versuchsapparatur ist in der nachstehenden Abbildung 6.5-1 zu sehen.

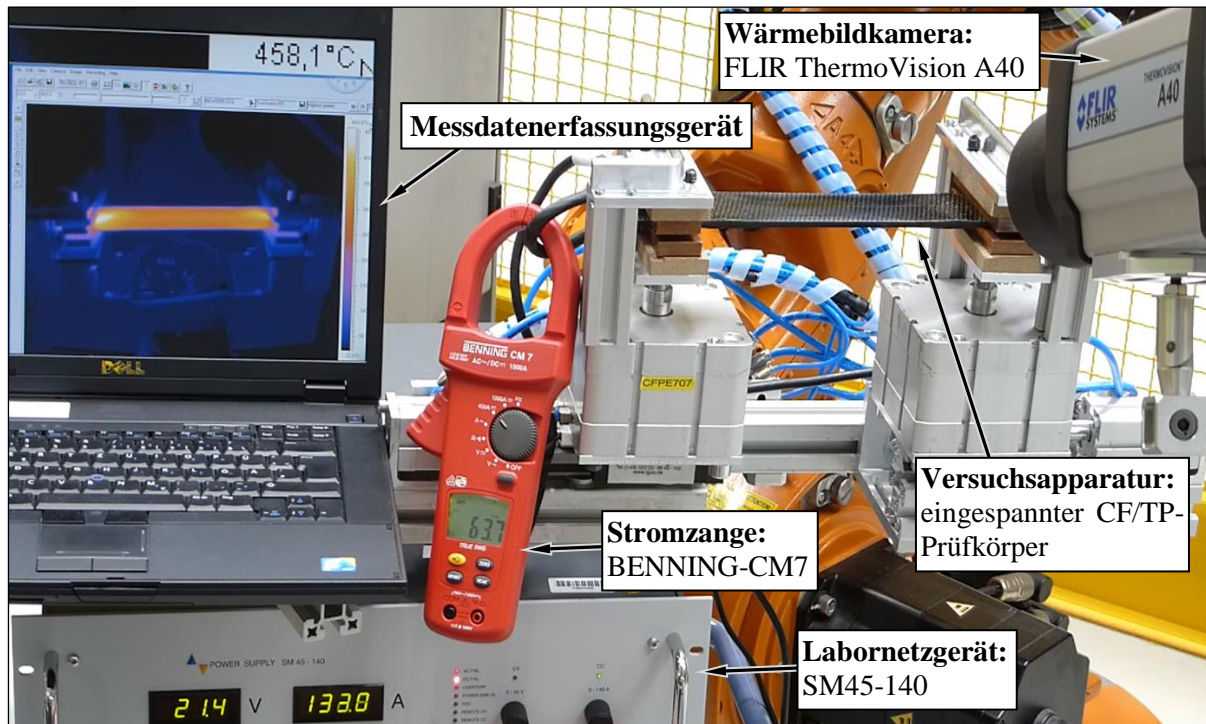


Abbildung 6.5-1: Versuchsaufbau zum Widerstandsheizen von Thermoplastgewebhalbzeugen

Während der Stromeinleitung ist eine sehr homogene Erwärmung des CF/TP-Probenkörpers zu beobachten. Lediglich der direkte Bereich vor den Kontaktzonen zeigt lokale Temperaturerhöhungen, die sich durch die nicht optimale Kontaktierungsgegebenheiten des Halbzeuges erklären lassen. Der Einfluss des Engwiderstands ist bei diesem Halbzeug besonders hoch, da die Fasern untereinander verwoben sind, die Matrix während der Erstarrung schwindet und sich demzufolge ein Wellenprofil an der unbehandelten Halbzeugoberfläche bildet. Bei der Auswertung der erfassten Messergebnisse konnten auffällige Kurvenverläufe bezüglich des über den Strom und die Spannung je Zeitintervall ermittelten Widerstandswertes festgestellt werden, die von ihrer Charakteristik unabhängig bzgl. Probengeometrie, Stromhöhe oder Matrixmaterial sind.

Auszugsweise sind nachstehend je ein aufgenommener Kurvenverlauf während der Direktbestromung einer CF/PPS-Probe (Abbildung 6.5-2 (links)) und einer CF/PEEK-Probe (Abbildung 6.5-2 (rechts)) exemplarisch dargestellt. Die abgebildeten Messergebnisse der Thermoplastprobenkörper CFPS673 und CFPE663 (Details vgl. Anhang 13.4) haben eine Größe von 280 mm x 52 mm bei einer Dicke von 4,36 mm und bestehen aus 14 Gewebelagen. Sie wurden jeweils zwischen zwei doppelseitige 30 mm breite Kupferkontaktklemmen mit 1,4 N/mm<sup>2</sup> über die komplette Breite von 200 mm eingespannt und mit 100 A (DC) bestromt.

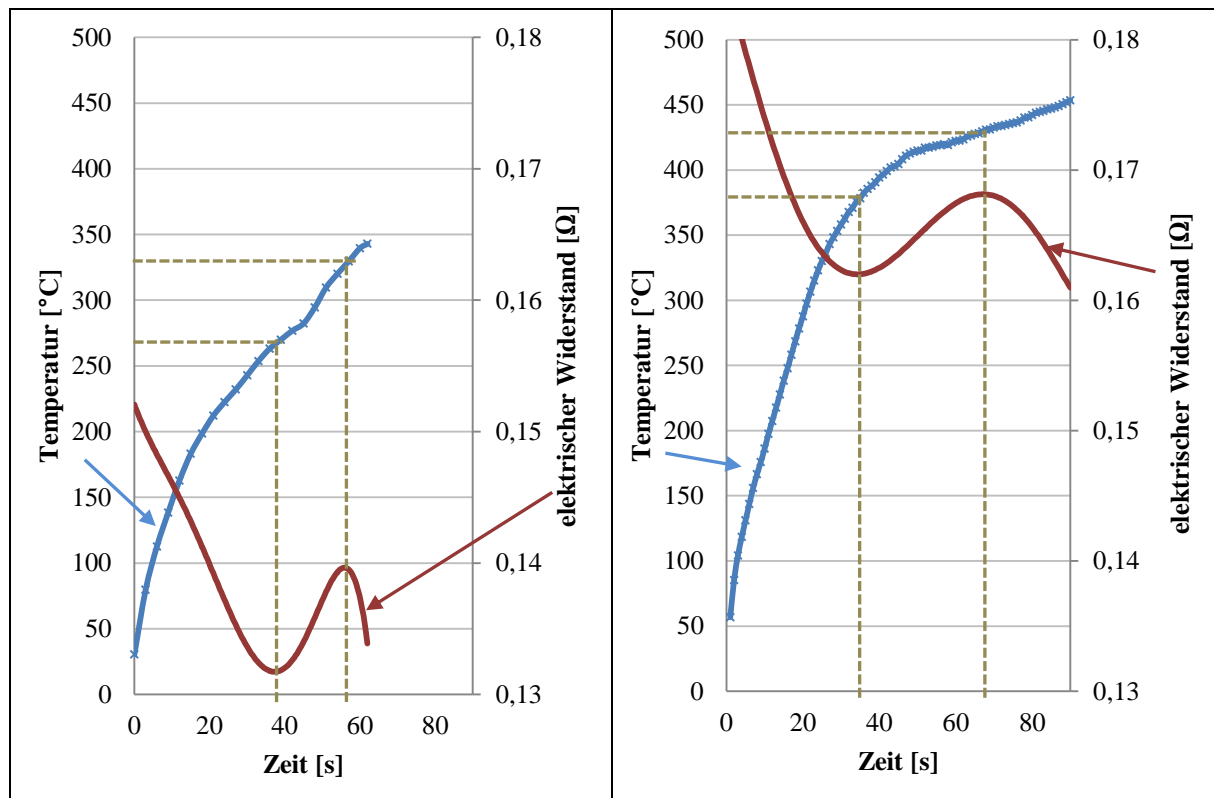


Abbildung 6.5-2: Halbzeugtemperatur einer CF/PPS-Probe gegen elektrischen Widerstand zeitsynchron aufgetragen (links) und Halbzeugtemperatur einer CF/PEEK-Probe gegen elektrischen Widerstand zeitsynchron aufgetragen (rechts)

Auffällig ist, dass die PEEK-Probe schneller höhere Temperaturen erreicht als die PPS-Probe. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, dass die Stromstärke bei beiden Versuchen identisch, der innere Widerstand jedoch verschieden ist. Nach der Formel (6-3) ergibt sich ein höherer Leistungseintrag in die PEEK-Probe über die Zeit, was die höhere Aufheizrate erklärt. Wird die Temperatur des Halbzeuges zum Zeitpunkt unmittelbar nach den Wendepunkten des elektrischen Widerstandes mit den in der Literatur angegebenen Schmelztemperaturen sowie den empfohlenen Umformtemperaturen (vgl. Tabelle 2.2-1) verglichen, so ist ein prägnanter Zusammenhang zu erkennen. Der plötzliche Anstieg des gemessenen Widerstandes der Thermoplasthalbzeuge bei Erwärmung trotz NTC-Verhalten der Kohlenstofffasern (vgl. Kapitel 6.3 *Wärmeeinfluss auf elektrische Leiteigenschaften*) lässt sich durch eine zu beobachtende Größenzunahme der Proben während des Widerstandsheizens erklären. Durch den Erweichungsprozess der Matrix können die bei dem Herstellungsprozess aufgebrauchten Kräfte zur Kompaktierung des Halbzeuges – zwecks Einstellung eines definierten Faservolumengehaltes – wieder freigesetzt werden. Durch diese Entspannung liegen die Kohlenstofffasern in der Matrix nicht mehr so eng aneinander, haben somit weniger Berührungspunkte und der Strom wird durch die Aufweitung schlechter durchgeleitet. Bestimmend für die Einflussgröße der Volumenzunahme ist – neben dem Ausdehnungsverhalten der Matrix – die Art der



Anordnung der Faserrovings untereinander im Halbzeug. So erzeugt ein bei der Herstellung kompaktiertes Gewebehalbzeug durch die Ondulation der verwobenen Fasern tendenziell höhere Rückstellkräfte bei der Erweichung der Matrix als die gering bis gar nicht ondulierten Fasern eines Gelegehalbzeuges. Zudem trägt der beidseitig von außen nach innen abnehmende Temperaturgradient (vgl. Kapitel 6.4 *Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern*) im Bereich der Heizzone mit Bezug auf Wärmeausdehnungskoeffizienten zu einer Beeinflussung dieser Geometrieänderung bei. Der Effekt der Volumenvergrößerung beruht allein auf dem Erwärmungsprozess als solches und entsteht somit auch bei den herkömmlichen Varianten zur Erzeugung der Umformwärme von Thermoplastfaserverbundbauteilen, wie beispielsweise mittels Infrarot-Heizfeldern (vgl. Abbildung 2.4-2). In der folgenden Abbildung 6.5-3 ist die thematisierte Geometrieänderung durch die Erwärmung dargestellt.

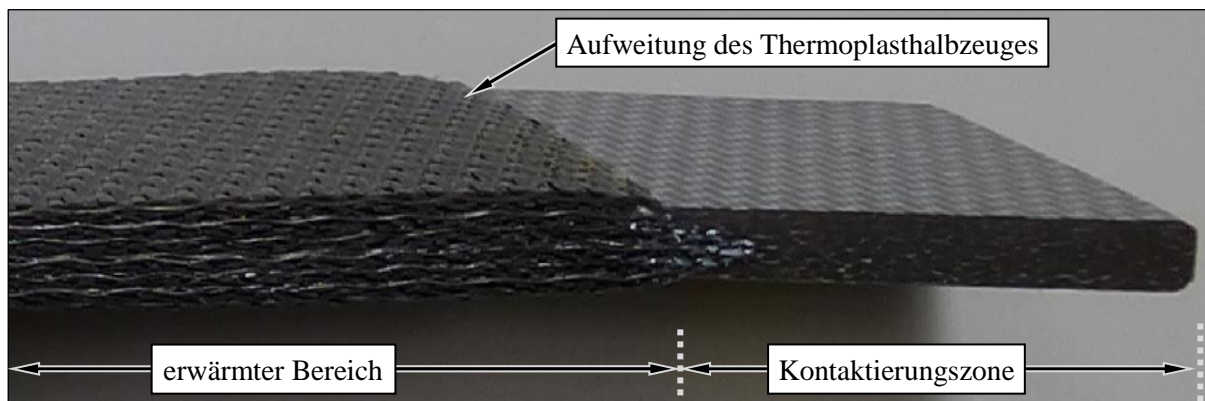


Abbildung 6.5-3: Volumenzuwachs eines durch Widerstandsheizen erwärmtes Thermoplasthalbzeug ohne Kompaktierung während der Erhitzung

Deutlich ist die Aufwölbung/Aufweitung des erkalteten Organoblechs im Widerstandsheizbereich, direkt hinter der Kontaktierungszone, zu erkennen. Die gemessenen Ausdehnungen der 36 beheizten Probenkörper betragen  $+42 \% \pm 6 \%$ . Beim Vergleich der Oberflächen in der Kontaktzone zum erwärmten Bereich fällt auf, dass diese unterschiedliche Rauheiten aufweisen.

Durch die aufgeschmolzene Thermoplastmatrix werden die Kohlenstofffasern nicht mehr in der erstarrten dreidimensionalen Geometrie gehalten. Die elastischen Anteile, die während des Aushärtevorgangs auf das Faserhalbzeug durch das Formwerkzeug bei der Geometrieherstellung eingebracht wurden, werden wieder freigesetzt. Dies hat zur Folge, dass sich das Halbzeug aufbauscht und die Matrix durch Kapillarwirkung zwischen die gewachsenen Zwischenräume der Fasern gezogen wird.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ist es nun möglich, allein durch die Analyse des eingeleiteten Stroms und der Kenntnis der zugehörigen Spannung den für den Umformprozess relevanten idealen Zeitpunkt für den Fertigungsprozess auszuleiten.

## 7 Geometrieangepasste Erwärmung von Trockenfasern

Die aufgeführten Versuche zur Grundsatzuntersuchung der Widerstandsheizung von Kohlenstofffasern haben die prinzipielle Machbarkeit des Prinzips als solches sowie deren Eigenarten und Abhängigkeiten aufgezeigt. Das Potenzial des Verfahrens soll bzgl. Variabilität und Effizienz deutlich herausgestellt werden. Aus diesem Grund werden im nächsten Schritt diverse separate Kontaktierungselemente umlaufend um das aufzuheizende Halbzeug appliziert. Die bisher thematisierte einfache elektrische Kontaktierung der Halbzeuge (Bestromungsstrecke A–B) wird durch eine komplexe Steuerung ergänzt, wodurch die Stromeinleitungspunkte in Gruppen, individuell oder paarweise angesteuert werden können. Durch diese Erweiterung soll das Verfahren die Machbarkeit zur gesteuerten Erwärmung sowie dessen Variabilität bzgl. unterschiedlicher Bauteilgeometrie, Lagenaufbau und Topologie durch ein individuell anpassbares Bestromungsmuster darlegen.

### 7.1 Gesteuerte Erwärmung

Zur programmierbaren Ansteuerung der Kontaktklemmen wird eine eigene Steuerung inklusive Softwareprogramm entwickelt und aufgebaut [115]. Mit ihr können bis zu acht Minus- und Pluspole angesteuert werden. Der Laststromkreis wird von einem 6 kW Netzteil (Präzisions Labornetzgerät SM45-140) gespeist und von der Steuerung über IGBTs (Halbleiterbauelemente) aufgeteilt, während der Steuerstromkreis durch ein 15 V Labornetzteil (Votcraft SPS-1560 PFC) versorgt wird. Die verwendeten IGBTs (IGBT-VS-GA200SA60S Premier Farnell) besitzen eine Gate-Emitter-Schleusenspannung  $U_{GE}$  von 3 V bis 6 V; die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  sinkt während der Sättigung auf 1,1 V ab. Die Sperrspannung  $U_{(BR)CE}$  beträgt max. 600 V und der maximale Durchlassstrom  $I_C = 200$  A bei ausreichend guter Kühlung. Als Alternative zum Schalten von Wechselstrom könnten Triacs eingesetzt werden, die aus zwei entgegen parallel geschalteten Thyristoren mit einer Steuerelektrode bestehen.

Die Versuche mit dieser Stromversorgung erfolgen ausschließlich mit einer in das Kohlenstofffaserhalbzeug eingeleiteten Spannung, welche die Grenzwerte für den Spannungsbereich I nach IEC 60449 nicht überschreitet. Demzufolge wird lediglich mit der Kleinspannung der Schutzklasse III (Wechselspannung (AC)  $\leq 50$  V und für Gleichspannung (DC)  $\leq 120$  V) gearbeitet. So kann eine lebensbedrohliche Gefährdung, selbst bei dauernder Berührung, ausgeschlossen werden.



Die manuell am Netzteil einstellbare Gleichstrommenge kann auch über die vorhandene Programmschnittstelle direkt übertragen und somit für jeden Bestromungsschritt individuell vorgegeben werden. Durch das eigens für die Widerstandsheizung von Kohlenstofffasern geschriebene LabVIEW-Programm können zeitabhängig Spannungspotenziale paar- oder gruppenweise auf die Kontaktierungsklemmen geschaltet werden. Die Programmierschnittstelle der Steuerung ist über LabJack mit dem Programmier-PC verbunden. In der folgenden Abbildung 7.1-1 ist dieser beschriebene Aufbau mit den wesentlichsten Komponenten zu sehen.

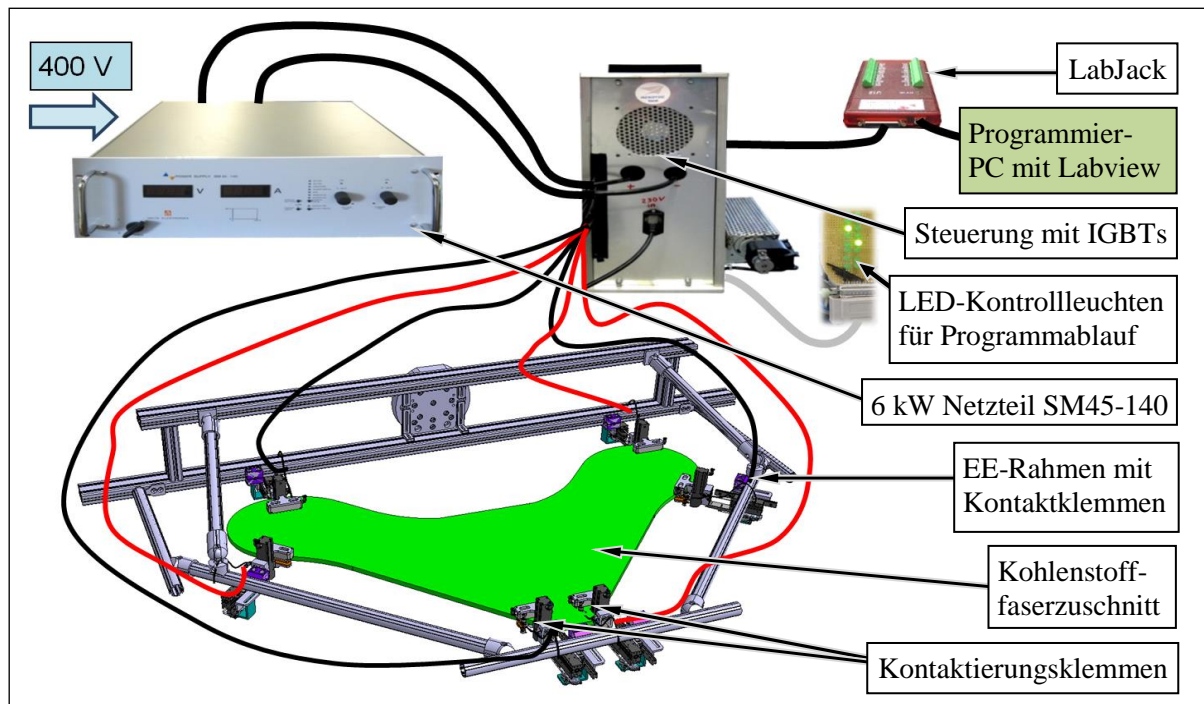


Abbildung 7.1-1: Komponenten zur gesteuerten Bestromung von Kohlenstofffasern

Die acht Plus- und acht Minusklemmen, die durch die Steuerung zur Verfügung gestellt werden, schaltet das generierte Programm in jedem Schritt in eine vorher festgelegte Plus- und Minuskonfiguration für eine definierbare Zeitdauer. Es entsteht eine Spannungsdifferenz und das zwischenliegende Kohlefasermaterial wird mit Strom durchflossen, woraufhin es sich aufgrund des Ohmschen Widerstandes erwärmt. Ist die festgelegte Bestromungsdauer für diesen Schritt abgelaufen, werden die Klemmen wieder abgeschaltet und das Programm wechselt in den nächstfolgenden Schritt, in dem wieder eine Plus- und eine Minusklemme geschaltet werden.

Neben der paarweisen Ansteuerung von Kontaktierungsklemmen können auch variable Gruppen geschaltet werden. So ist es beispielsweise möglich, den Strom von einer Plusklemme zu zwei verschiedenen Minusklemmen zu leiten, die sich an unterschiedlichen Stellen befinden können. Zur Visualisierung werden die einprogrammierten Schaltvorgänge zusätzlich über eine LED-Platine ausgegeben. Die Anzahl der Schritte je Zyklus sowie der Durchläufe sind variabel und können als

Dauerschleife betrieben werden. Das Steuerungsprogramm ist zudem in der Lage, die Parameter eines Schaltschemas während der Eingabe auf ihre Gültigkeit zu prüfen und dem Anwender eine eventuell fehlerhafte Eingabe anzuzeigen. Der Prozessfortschritt des Aufheizvorgangs wird dem Benutzer mittels einer Zeitangabe und grafisch über einen Prozessbalken dargestellt. Eine zusammenfassende Darstellung der Bedienoberfläche der Steuerung sowie deren Einstellmöglichkeiten ist im Anhang 13.6 *Bedienoberfläche zur gesteuerten Stromeinleitung* abgebildet.

## 7.2 Homogene Erwärmung asymmetrischer Zuschnittgeometrien

Im ersten Schritt soll die Effektivität der Erwärmungssteuerung in Bezug auf drei unterschiedliche Faserhalbzeuge mit je einer einfachen Kreisscheibengeometrie mit einem Durchmesser von 420 mm getestet werden. Die unterschiedlichen Halbzeuge sollen mit kreuz- und kreisförmigem Bestromungsmuster aufgeheizt werden, um Charakteristiken zu identifizieren und Annahmen zu verifizieren. Das erste Muster wird als Kreuzschaltung bezeichnet, da es jeweils nacheinander paarweise die gegenüberliegenden Kontakte miteinander beschaltet. Dadurch ergeben sich drei Bestromungsstrecken. Die zweite Schaltungsvariante wird als Kreisschaltung bezeichnet und leitet den voreingestellten Strom jeweils von einer Klemme zur nächstliegenden im Uhrzeigersinn, woraus sich sechs Schaltvorgänge je Zyklus ergeben. Die programmierten Schaltmuster der Erwärmungsstation sowie der Versuchsaufbau sind in Abbildung 7.2-1 dargestellt.

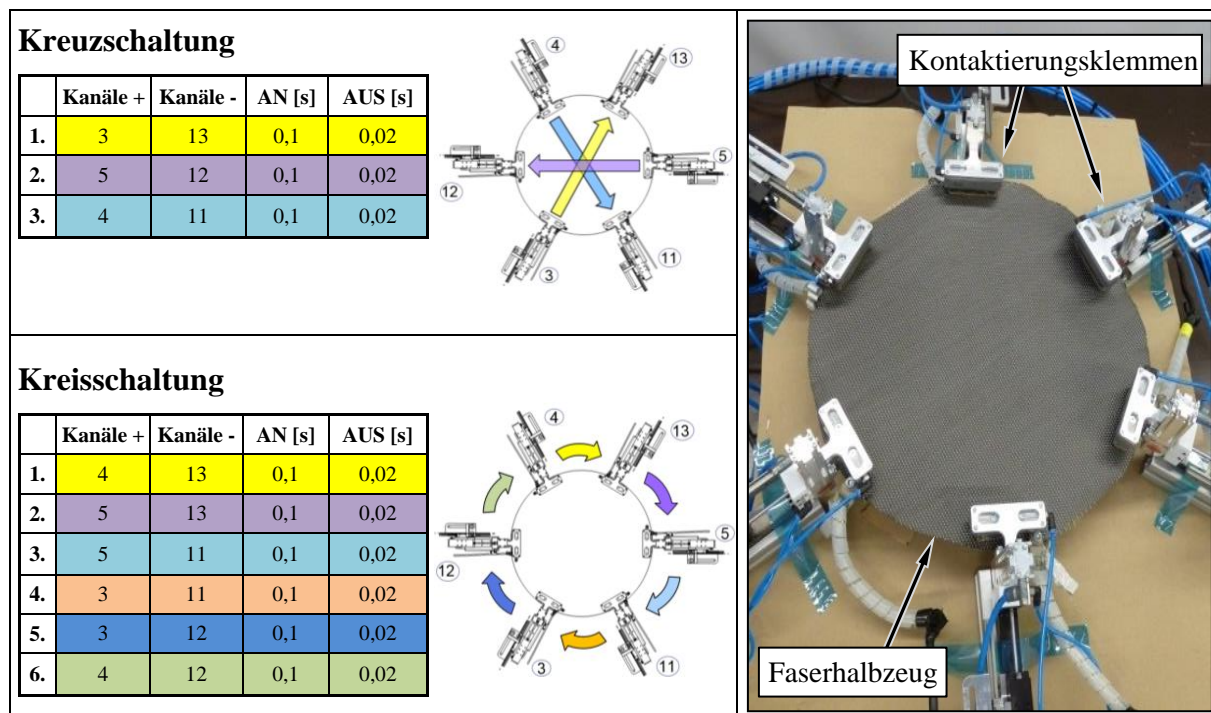


Abbildung 7.2-1: Bestromungsmuster für Kreisscheibenerwärmung (links) und Versuchsaufbau zur gesteuerten Erwärmung eines Halbzeugkreises (rechts)

Als Stromstärke wird ein Wert von 60 A eingestellt. Die mittels Wärmebildkamera (ThermoVision™ A40-M) detektierten Wärmebilder werden in den nachfolgenden Abbildung 7.2-2 (linke Spalte) für die Kreuzschaltung und in Abbildung 7.2-2 (rechte Spalte) für die Kreisschaltung aufgeführt.

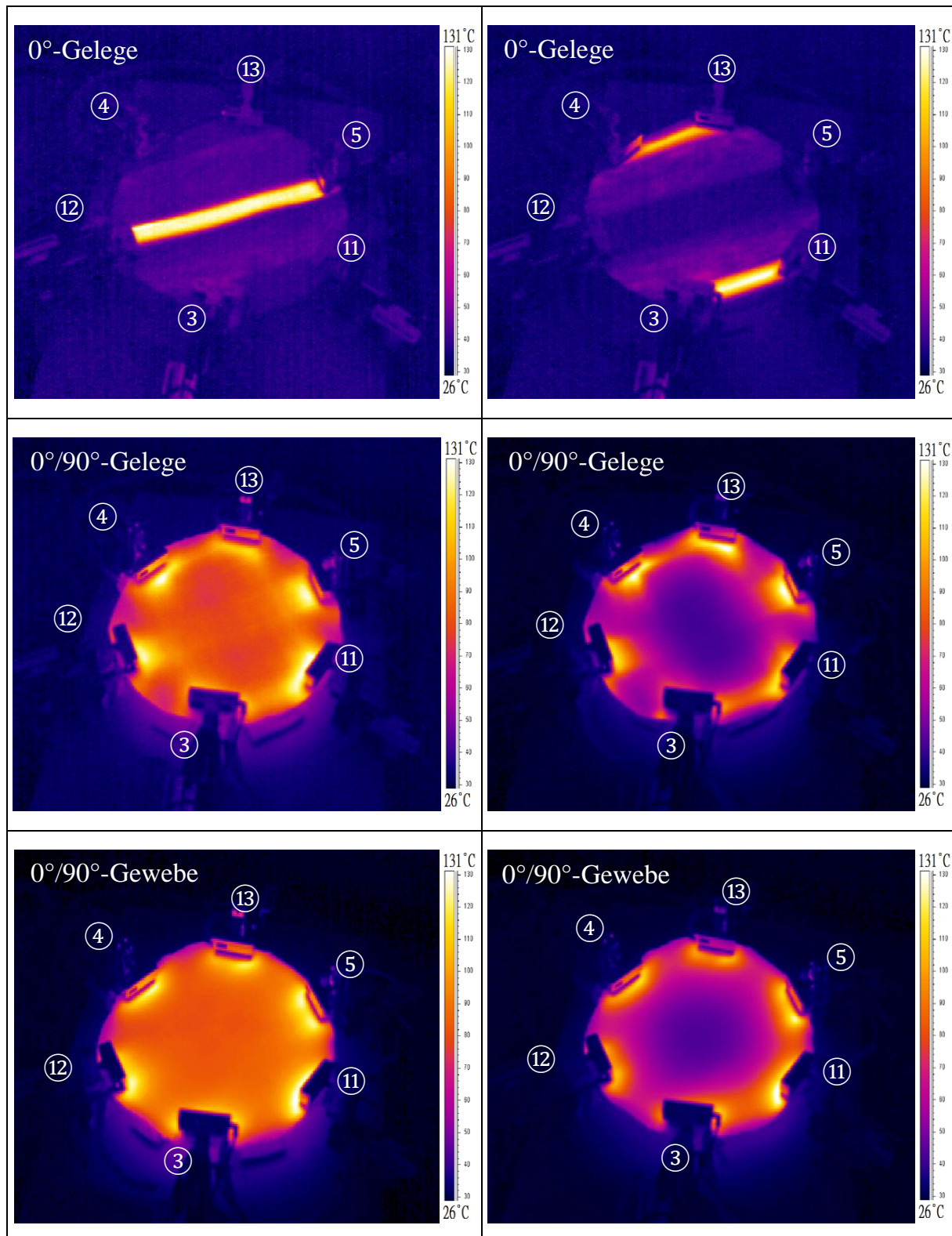


Abbildung 7.2-2: Erwärmungsergebnisse mit Kreuzschaltung (linke Spalte) und Erwärmungsergebnisse mit Kreisschaltung (rechte Spalte)



Aus den Wärmebildaufnahmen geht hervor, dass die Kreuzschaltung zu einer eher flächigen und die Kreisschaltung zu einer primär randbezogenen Erwärmung des Zuschnittes führt. Deutlich ist auch der Einfluss der Faserorientierung und der Halbzeugkonfiguration zu erkennen. Mit zunehmender Vielfältigkeit des Orientierungsgrades der Fasern wird über die bewusst klein gehaltene Stromeinleitungsfläche (zur Verbesserung der nachgeschalteten Umformung in eine 3D-Bauteilkontur) eine gleichmäßigere Aufheizung erzielt. Die Orientierungen unterschiedlicher, übereinanderliegender Faserlagen lassen sich im Wärmebild durch ihre Aufheizreaktion erkennen und somit durch Kenntnis der angewandten Schaltungsschemas der Widerstandsheizung folglich bestimmen. Durch die Ondulation der Fasern beim Gewebematerial werden weitere Homogenisierungsmechanismen angestoßen, da die Kreuzungspunkte der Faser dazu beitragen, den eingeleiteten Strom besser quer zur Faserrichtung zu übertragen und damit planar aufzustreuen. Zudem tauchen durch die Ondulation obenliegende, kontaktierte Fasern durch das Halbzeug in tiefere Schichten ab, wodurch die quer zur Faserachse schlechteren Leiteigenschaften teilweise ausgeglichen werden. Aus den Aufheizversuchen des 0°-Halbzeuges wird sehr deutlich, dass die Leitfähigkeit der Fasern quer zur Faserachse kaum vorhanden ist.

Die Bestromungssteuerung soll im Folgenden an einer komplexeren Zuschnittgeometrie getestet werden, weshalb ein anspruchsvolles Demonstratorbauteil definiert wird. Diese CFK-Hohlkörperstruktur ist eine frei erfundene Geometrie in Anlehnung an ein Strukturbauteil. Der Probenkörper besteht aus einer Unter- und einer Oberschale, die nach dem RTM-Prozess gefügt werden. Das fertiggestellte CFK-Bauteil hat die Außenmaße von 1000 mm x 550 mm x 110 mm und ein Gewicht von 1,497 kg. Die 3D-Geometrie der beiden Bauteilhälften sowie deren Zusammenbau ist in Abbildung 7.2-3 dargestellt.

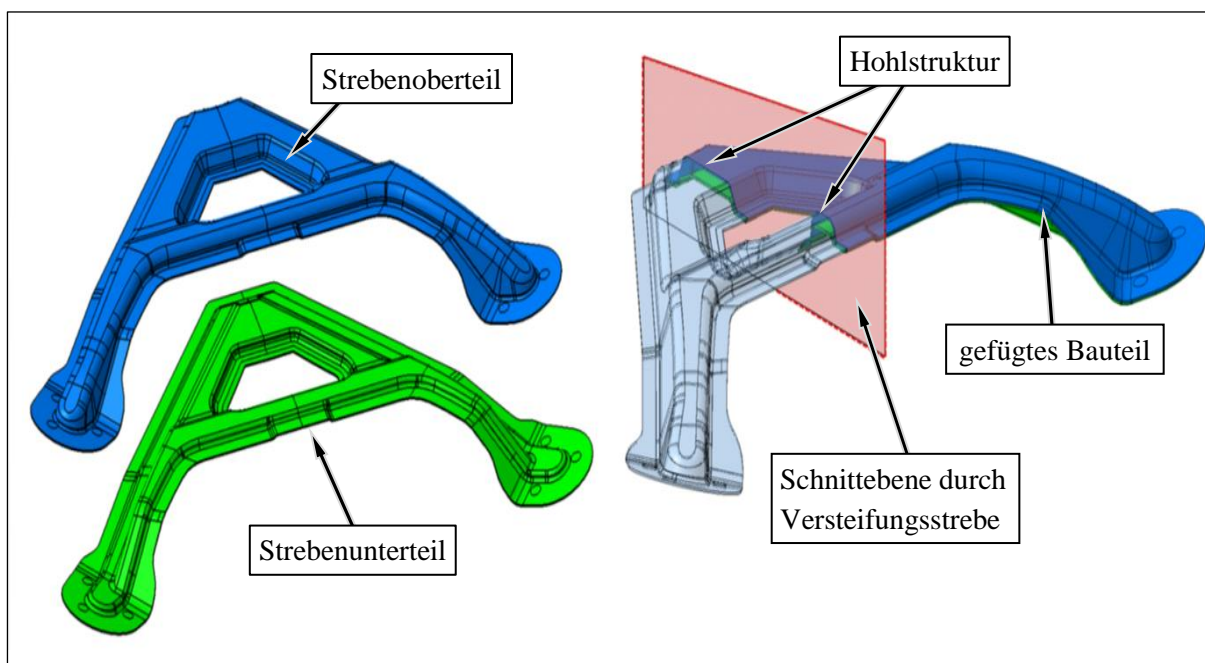


Abbildung 7.2-3: Design des entworfenen RTM-CFK-Strukturbauteils

Aus der vorgegebenen Bauteilgeometrie wurde das zugehörige Zuschnittmuster für die Faserhalbzeuge abgeleitet. Die Bestromungspunkte und Kontaktierungsflächen ergeben sich aus den Freiheitsgraden des Umformprozesses vom 2D-Zuschnitt zum 3D-Preform. In vorangegangenen Versuchen zur Bestimmung der Zykluszeit und des Energiebedarfes eines derzeit üblichen automatisierten Preformprozesses wurden diese restriktiven Haltepunkte ermittelt (vgl. Abbildung 2.3-3). Aufgrund der komplexen 3D-Geometrie und der Vorgabe zur Verschnittminimierung ergeben sich lediglich drei Bereiche, in denen Strom in die Fasern eingeleitet werden kann. Diese befinden sich an den drei äußersten Eckbereichen der Unter- als auch Oberschale des CFK-Demonstratorbauteils. Abbildung 7.2-4 (links) zeigt schematisch die Anordnung der sechs Kontaktierungsklemmen in diesen vorgegebenen Bereichen; Abbildung 7.2-4 (rechts) zeigt den in den Halterahmen eingespannten Faserzuschnitt.

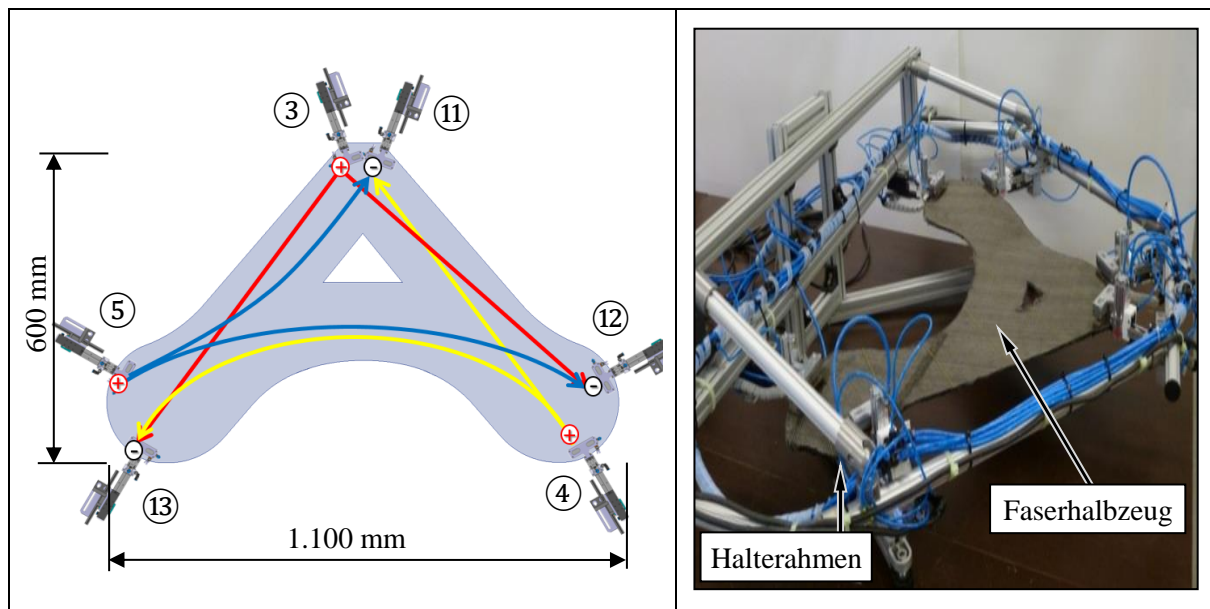


Abbildung 7.2-4: CF-Zuschnitt mit Anordnung sowie Bezeichnung der Kontaktierungsklemmen (links) und Versuchsaufbau zur Erwärmung des Demonstratorzuschnittes (rechts)

Für den Zuschnitt der Bauteilhälften wird eine Dicke von je 1,5 mm bestimmt. Diese setzt sich aus drei Lagen mit einer Stärke von je 0,5 mm aus bidirektionalem Gelege (6 K 267 g/m<sup>2</sup>, vgl. Datenblatt Anhang 13.3) zusammen. Die äußersten Lagen sind  $\pm 45^\circ$  orientiert, die mittlere ist  $0^\circ/90^\circ$  orientiert. Zwischen den drei Lagen befindet sich je eine 6 g/m<sup>2</sup> schwere Schicht Thermoplastbindervlies (PA-Vlies 1541). Die Oberfläche des Zuschnittes beträgt 0,657 m<sup>2</sup>, woraus sich eine Masse des Zuschnittes von 0,534 kg  $\pm$  28 g ergibt. Die Versuche zur Erwärmung des Demonstratorzuschnittes werden mit einer konstant eingestellten Stromstärke von 120 A und variablem Bestromungsmuster durchgeführt. In der nachstehenden Abbildung 7.2-5 (links) sind zwei der eingestellten Parameter zu sehen; der rechte Teil der Abbildung (Abbildung 7.2-5 (rechts)) zeigt die jeweils daraus resultierenden Erwärmungsbilder.

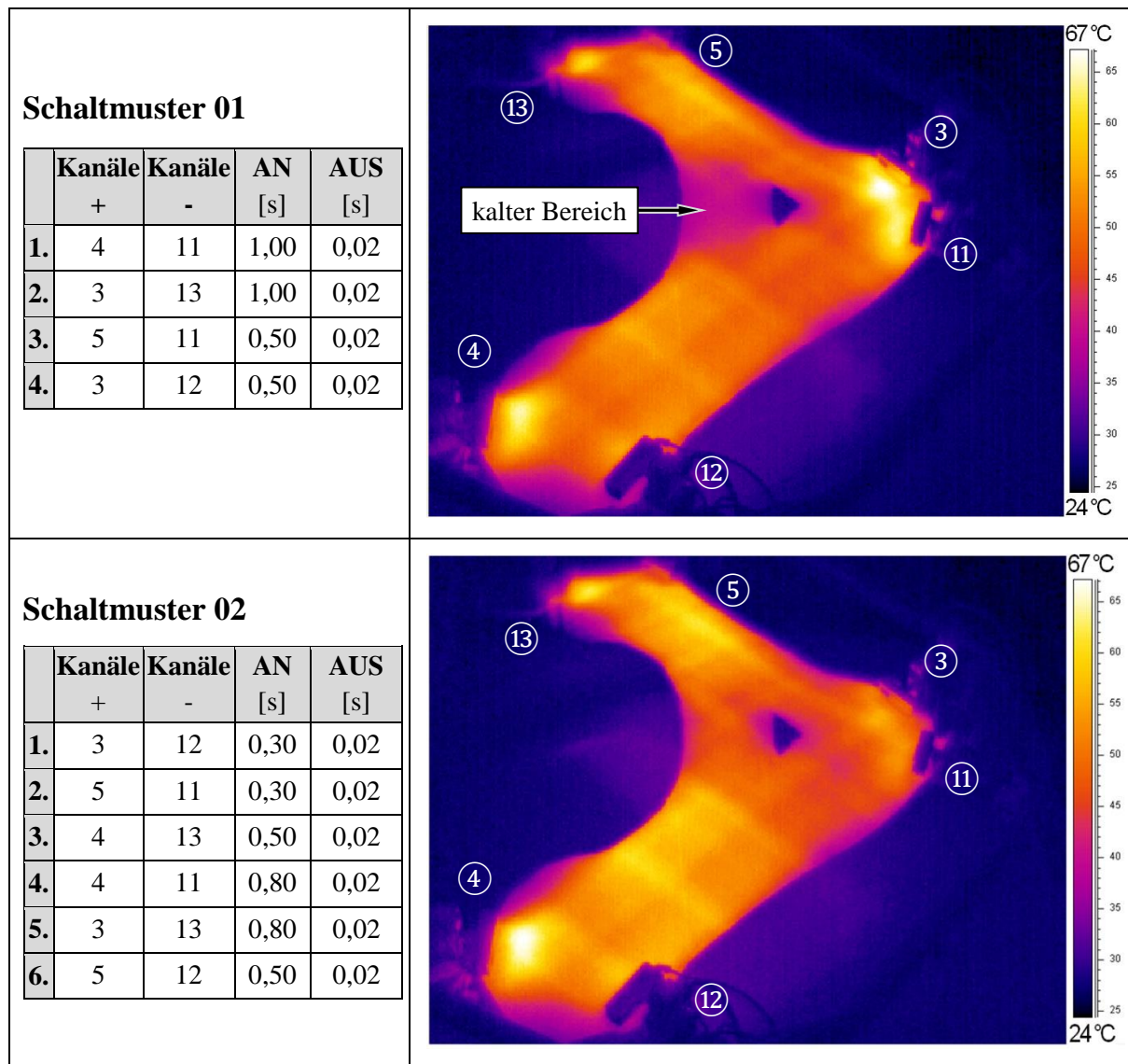


Abbildung 7.2-5: Steuerungsparameter für Schaltmuster 01 & 02 (links) und Erwärmungsbilder des CF-Zuschnittes mit identischem Halbzeug und unterschiedlichem Bestromungsmuster (rechts)

Bei der Betrachtung des resultierenden Wärmebildes aus den Steuerungsparametern nach Schaltmuster 01 werden Inhomogenitäten sichtbar. Zum einen führen die längeren Einschaltzeiten an den Klemmelektroden 3 und 11 gepaart mit deren fehlenden Pausen zu lokalen Temperaturerhöhungen. Diese werden durch den Übergangswiderstand von der Kupferelektrode auf das Kohlenstofffaserhalbzeug hervorgerufen. Des Weiteren ist ein Bereich in der Mitte des Zuschnittes beim Schaltmuster 01 zu erkennen, der weniger stark bestromt und damit langsamer erwärmt wird. Aus diesem Grund werden die Eingabeparameter in die Steuerung entsprechend angepasst und als Schaltmuster 02 zusammengefasst, um die Erwärmung zu homogenisieren. Das sich ergebende Wärmebild zeigt eine relativ gleichmäßige Erwärmung, trotz der im Verhältnis zur Gesamtfläche des Zuschnittes kleinen Kontaktierungsbereiche. Mit der gezeigten Konfiguration kann der Zuschnitt mit 120 A von Raumtemperatur innerhalb von 15 s im kältesten Bereich

über die geforderte Erweichungstemperatur des Thermoplastbinders auf 120 °C erwärmt werden. Demzufolge kann durch eine entsprechend angepasste Ansteuerung (Zuschalten, Wegschalten, Potenzialeinstellung bzw. Heizstromeinstellung) zuschnittsbezogen effizient eine gewünschte Temperierung eingestellt werden.

### 7.3 Erwärmung integraler und lokal verstärkter Geometrien

Das Potenzial einer Faserverbundstruktur wird gänzlich ausgeschöpft, wenn neben der fasergerechten Auslegung mehrere einzelne Bauteile zusammen in einem Fertigungsprozess zu einem Integralbauteil gefertigt werden. Durch die bei einer Differenzialbauweise vorzuhaltenden Fügeflächen wird zwangsläufig Mehrgewicht hinzugegeben, das bei einer Integralbauweise eingespart werden kann. Ein repräsentatives Beispiel sind die zur Erhöhung der Beulsteife auf der Innenseite von Flugzeugrümpfen applizierten Hutstringer.

Damit das thematisierte Bestromungskonzept auf eine derartige integrale Bauteilstruktur angewandt werden kann, wird die bereits in Kapitel 6.2 behandelte Testgeometrie (Geometriespezifikation, vgl. Abbildung 6.2-1) herangezogen. Ziel bei dieser Untersuchung ist der Vergleich der bereits gewonnenen Ergebnisse der Widerstandsermittlung aus Kapitel 6.2 mit dem tatsächlichen Erwärmungsverhalten bei dem Widerstandsheizkonzept der Stringergeometrie. Mit diesem Versuchsaufbau soll außerdem gezeigt werden, ob und wie komplexe 3D-Preforms mit dem Prinzip der Widerstandsheizung von Kohlenstofffasern erwärmt werden können. Als Testmaterial für den Probenkörper wird ein quadraxiales und bidirektionales Gelegehalbzeug (vgl. Datenblatt Anhang 13.3) herangezogen. Der Versuchsaufbau mit dem entsprechenden Lagenaufbau des Stringerpreforms ist schematisch in Abbildung 7.3-1 dargestellt.

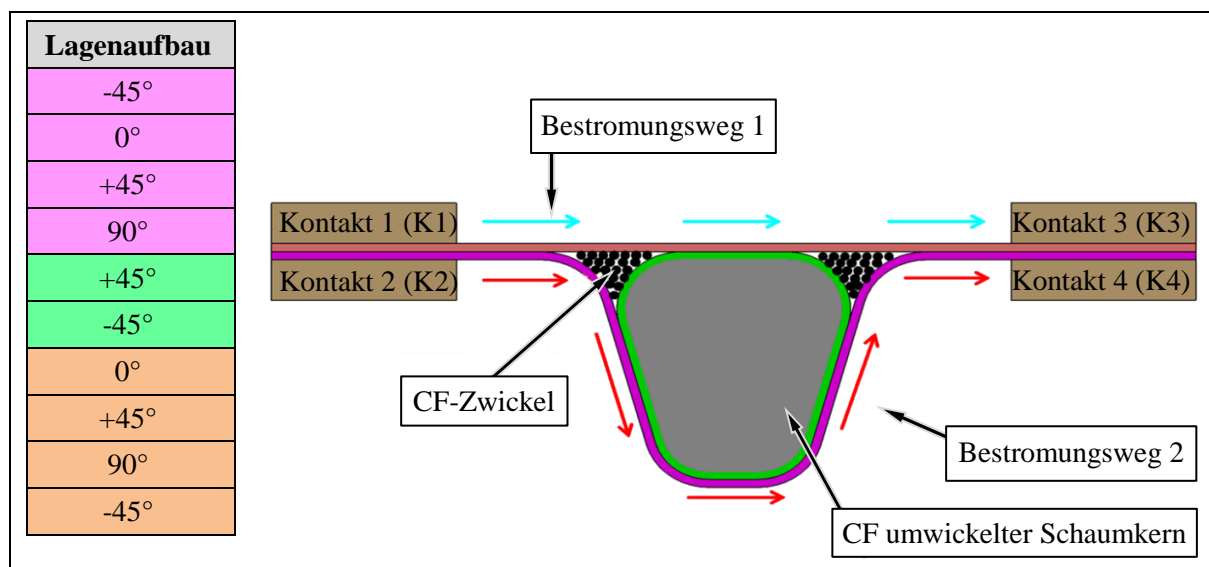


Abbildung 7.3-1: Versuchsaufbau zur Erwärmung eines komplexen Kohlenstofffaserpreforms



Durch die zwischengeschaltete Steuerung können die einzelnen Kupferkontakte unterschiedlich miteinander geschaltet werden. Es werden im Folgenden die Schaltungsmuster K2–K4, K1–K3, K2–K3 sowie K1&K2–K3&K4 eingestellt. Da der innen liegende, mit Kohlenstofffasern ummantelte Schaumkern aus Rohacell IG 71 außer einer nach innen gerichteten Isolierung keinen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten hat, wird er zur Verbesserung der folgenden Wärmebildaufnahmen entfernt. In der Abbildung 7.3-2 sind die entsprechenden Erwärmungsergebnisse je Kontaktierungsvariante zu sehen.

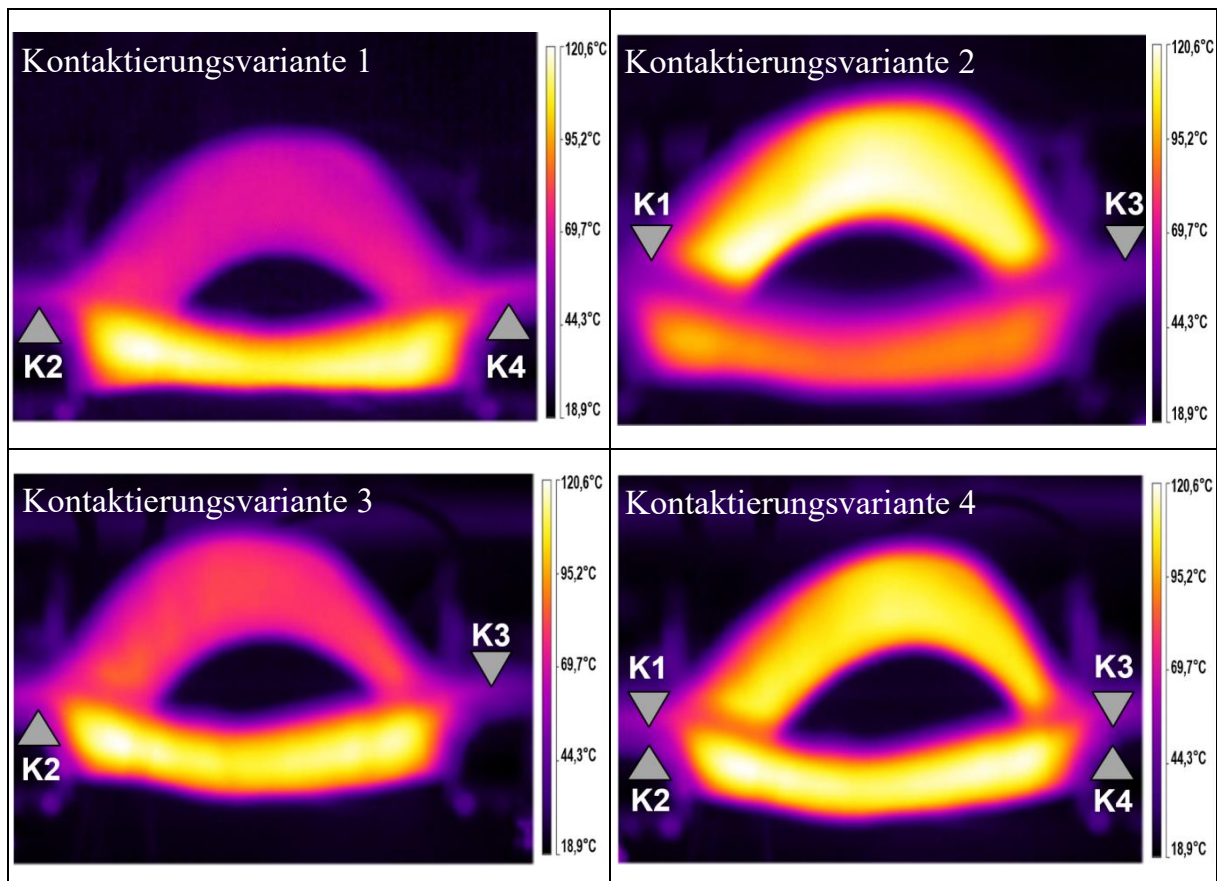


Abbildung 7.3-2: Wärmebilder einer CF-Hutstringerbestromung bei unterschiedlichen Kontaktierungsvarianten

Bei der Betrachtung des Erwärmungsverhaltens zeigt sich, dass eine einseitige Kontaktierung zwar zu einer teilweisen Temperaturerhöhung der davon am weitesten entfernten Kohlenstofffaserlage führt, nicht jedoch zu einer homogenen Erwärmung des gesamten Faserhalbzeugs. In der Kontaktierungsvariante 4 wird eine fast komplett gleichmäßige Erwärmung erreicht. Der Temperaturunterschied zwischen den kürzeren unteren Kohlenstofffaserlagen zu den oberen ist marginal. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, dass die Längenunterschiede von 18 mm ebenfalls sehr gering sind. Infolgedessen ist für eine derartige als auch für andere aufzuheizende Bauteilgeometrien mit komplexer dreidimensionaler Kontur mit größeren Längenunterschieden der Kohlenstofffasern eine beidseitig kontaktierter Bestromungsaufbau die sinnvollste Lösung. In Kombina-



tion mit einer gesteuerten Bestromung kann das Erwärmungsergebnis von derartige Lagenaufbauten mit Halbzeugen unterschiedlicher Länge noch verbessert werden. Durch die zeitliche Anpassung der Stromdurchleitungsdauer von K1 zu K3 sowie von K2 zu K4 bzw. durch dessen jeweilige Stromhöhe kann der Preform homogen erwärmt werden. Für sehr große Preforms können – je nach Lagenaufbau – mittig applizierte Kontaktierungsflächen zur Stromeinleitung von Vorteil sein.

In der Entwicklung von gewichtsoptimierten Faserverbundbauteilen ist zu beobachten, dass vermehrt lokale Verstärkungslagen nur an Bereichen mit höheren Lasten aufgelegt oder zwischen zwei Decklagen positioniert werden, um das Gesamtgewicht des betreffenden Bauteils zu reduzieren. Dies führt zur Notwendigkeit von anspruchsvollen Erwärmungssystemen, die eine homogene Temperaturerhöhung im Halbzeug mit stark variierenden Dickenrichtungen erlauben. Die Positionen mit lokal höheren Faseranteilen können mittels einer gezielten Kreuzsteuerung durch Kontaktklemmen aus dem Randbereich oder über zusätzliche Kontaktflächen nahe der Verstärkung aufgeheizt werden. Das Funktionsprinzip einer derartigen Kreuzschaltung ist zur Verdeutlichung schematisch in Abbildung 7.3-3 links dargestellt.

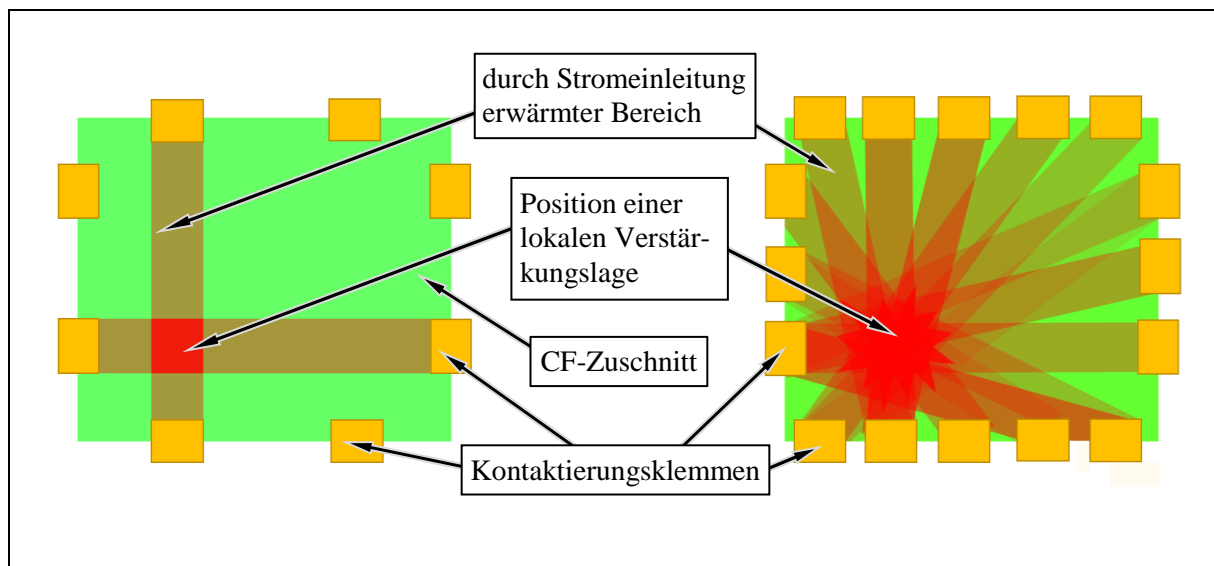


Abbildung 7.3-3: Prinzipdarstellung einer provozierten asymmetrischen Erwärmung

Die abwechselnde Ansteuerung der auf einer Achse liegenden und durch den zu erwärmenden Bereich führenden Kontaktierungsklemmen generiert im Kreuzungspunkt ein erhöhtes Temperaturniveau im Vergleich zu dem umliegenden Gebiet. Die Konzentration dieser Temperaturerhöhung kann durch eine höhere Anzahl an steuerbaren Kontaktbereichen verbessert werden (vgl. Abbildung 7.3-3, rechte Darstellung). Festzuhalten ist, dass durch eine Vielzahl von Kontaktierungsflächen ein individuelles Schema programmiert werden kann, das in der Lage ist, die gleichmäßige Erwärmung eines ebenen, asymmetrischen als auch komplexen Kohlefaserzuschnitts mit diffizilem Höhenprofil oder Hohlkörper zu ermöglichen.

## 7.4 Optimierte Preformtopologieerstellung

Eine erste Implementierung des beschriebenen Konzeptes zur Erwärmung von Kohlenstofffasern in die Fertigung von CFK-Bauteilen könnte der Preformprozess sein. Der Vorteil wäre eine Reduktion hinsichtlich des erforderlichen Aufwandes an Zeit und Energie durch die Verbesserung des derzeitigen Verfahrens zum Bereitstellen eines Faservorformlings. Diesbezüglich wurde für das thematisierte Erwärmungskonzept ein Verfahren entwickelt, das dadurch gekennzeichnet ist, dass der Transport eines Faserzuschnittes mittels einer Vorrichtung durchgeführt wird und während des Transports ein Aufheizen des Fasermaterialzuschnittes durch eine elektrische Bestromung des Fasermaterialzuschnittes erfolgt [116]. Durch die direkte Stromeinleitung an mehreren fest definierten Stellen des Zuschnittes kann die Erzeugung eines erwarteten Faservorformlings gegenüber herkömmlichen Herstellungsverfahren signifikant beschleunigt werden, da vorteilhaft schon während des Transportprozesses ein Aufheizen des Fasermaterialzuschnittes erfolgt. Der Zuschnitt fungiert somit selbst als elektrische Widerstandsheizung und erwärmt sich während des Transports. Der hierfür notwendige Energieaufwand zur Binderaktivierung wird durch das vorgesehene direkte Aufheizungskonzept auf ein Minimum reduziert. Die kombinierte Nutzung des Transportprozesses für ein Aufheizen des Fasermaterialzuschnittes ermöglicht insbesondere bei einer Serienfertigung von Faservorformlingen bzw. deren Verarbeitung zu Faserverbundbauteilen eine besonders vorteilhafte Verringerung von Zykluszeiten. Besonders vorteilhaft ist, dass ein separater Erwärmungsschritt überflüssig wird. Die Gleichmäßigkeit der Erwärmung wird durch fest vorgegebene Stromeinleitungsstellen eingegrenzt, kann aber mittels angesprochener Steuerung durch ein während des Transports des Fasermaterialzuschnittes zeitlich variierendes Bestromungsschema optimiert werden.

Zu Funktions- und Demonstrationszwecken wird ein Endeffektor (bereits gezeigt in Abbildung 7.2-4 (rechts)) konzipiert, der mit Kontaktierungseinheiten (identisch zu Abbildung 6.2-4) zum Aufheizen des Fasermaterialzuschnittes während des Transports durch eine elektrische Bestromung ausgestattet ist. Bei der Konstruktion des Endeffektors wird auf Gewichtsminimierung geachtet, weshalb die Kontaktierungselemente lediglich 467 g je Einheit und der komplette, voll funktionsfähige Endeffektor ein Gewicht von 25,32 kg bei weniger als 3 mm zulässiger Durchbiegung aufweist [111]. Die Funktionsweise der Greif- und Kontaktierungselemente ist derart konstruiert, dass diese in der Lage sind, einen bereitgestellten Faserzuschnitt automatisiert aufzunehmen, abzuspannen, aufzuheizen und während des Umformvorganges nachgiebig festzuhalten. Die sich nach der dreidimensionalen Verformung zu einem Preform neu einstellende, verkürzte Halteposition kann damit fixiert und der erstellte Preform somit positionsgenau abgelegt werden. Die nachstehende Abbildung 7.4-1 zeigt eine denkbare Konstellation eines entsprechenden Fertigungskonzeptes zur ökologischen und ökonomischen Generierung von Kohlenstofffaserpreforms anhand der bereits thematisierten Demonstratorgeometrie.

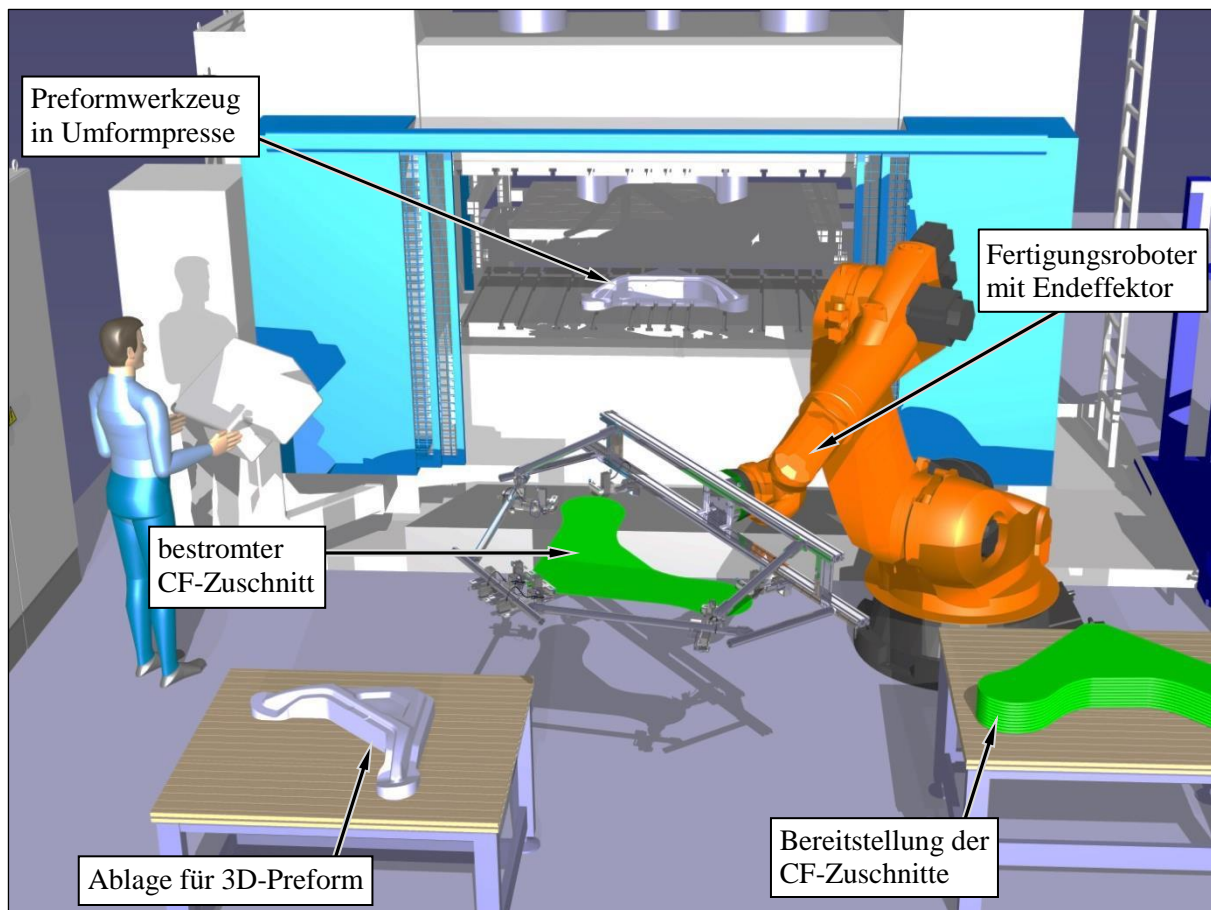


Abbildung 7.4-1: Automatisiertes Fertigungskonzept zum Erstellen von Kohlenstofffaserpreforms mit reduzierter Zykluszeit und minimalisiertem Energieaufwand

Abgebildet sind die zum automatisierten Umformen von Fasermaterialzuschnitten notwendigen Einheiten: eine Anlieferungsstation (realisiert durch einfachen Bereitstellungstisch), ein Ablegetisch für den erstellten Preform, ein Industrieroboter (KUKA KR 250-2000) mit entsprechendem Endeffektor sowie eine Presse mit eingetaktetem Formwerkzeug. Der gesamte Transport des Fasermaterialzuschnittes durch die Prozessstrecke erfolgt dabei mittels des Industrieroboters, der das Fasermaterial automatisch ergreift und erst nach dem Umformprozess den Preform wieder positionsgenau ablegt.

Der Preformherstellungsprozess beginnt mit der automatisierten Zuschnittaufnahme. Dazu werden die Spannbacken SB mittels Kraftspanner pA1 geöffnet und mittels des pneumatischen Linearschlittens pA3 durch Ausfahren der Schubstange SA3 in eine zum Ergreifen des Zuschnittes Z1 geeignete Stellung gebracht. Abbildung 7.4-2 (links) zeigt dieses Stadium des Verfahrensablaufs.

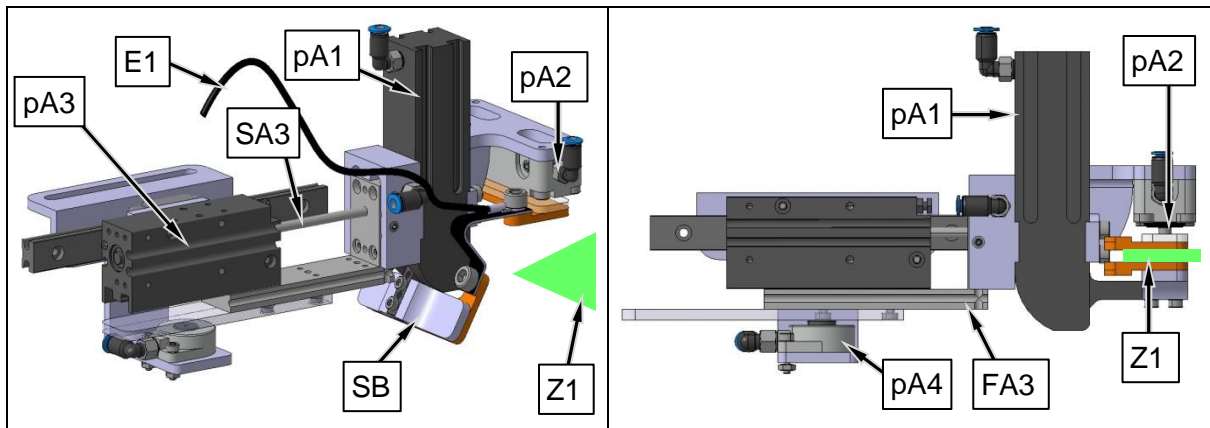


Abbildung 7.4-2: Ergreifen des CF-Zuschnitts (links) und Halten des CF-Zuschnitts (rechts)

Anschließend werden die Spannbacken SB geschlossen, sodass der CF-Zuschnitt am beabsichtigten Randbereich ergriffen wird. Durch die Aktivierung des Klemmzylinders pA2 wird jetzt die notwendige Kontaktkraft zwischen Kupferleitern und Faserzuschnitt zur Reduktion des Übergangswiderstandes aufgebracht. Daraufhin wird die Schubstange SA3 wieder eingefahren, damit der ergriffene Zuschnitt Z1 im Rahmen abgespannt wird. Dieser Prozessschritt ist in Abbildung 7.4-2 (rechts) dargestellt. Die aufgenommenen Kohlenstofffasern werden jetzt mittels Bestromung E1 erwärmt, während der Roboter den Endeffektor von der Aufnahme position zur Umformstation transferiert (vgl. Abbildung 7.4-3 (links)).

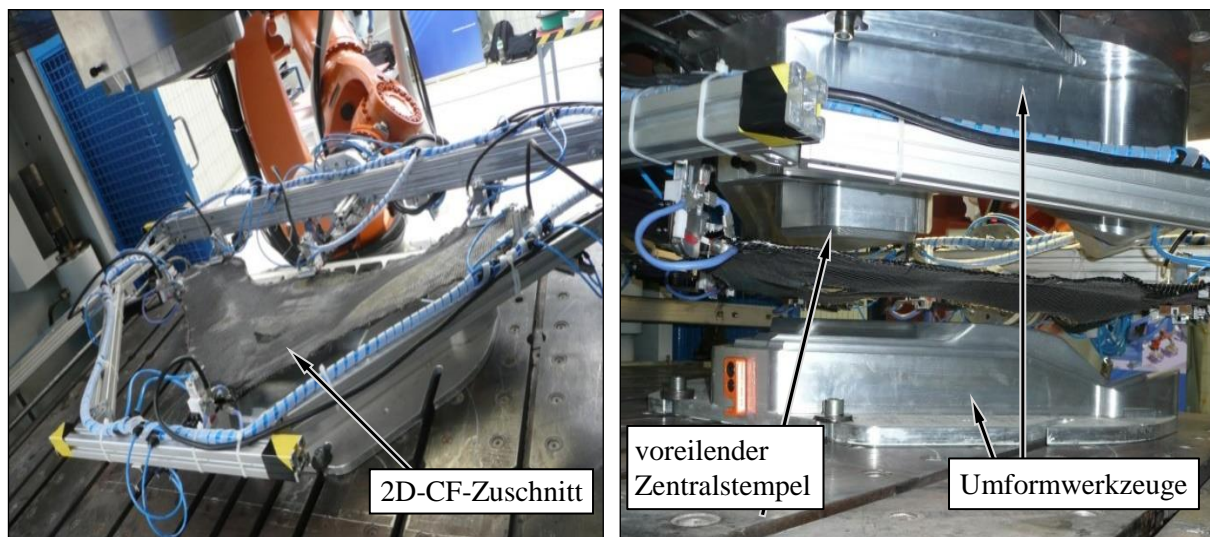


Abbildung 7.4-3: Roboter transportiert CF-Zuschnitt zwischen die Umformwerkzeuge (links) und Presse fährt bis kurz vor Kontakt zum CF-Zuschnitt zu (rechts)

Zwischen Druckplatte und Kupferelektrode ist jeweils eine 3 mm dicke Schicht zur Wärmedämmung appliziert, sodass die Verlustwärme reduziert werden können. Diese Dämmplatte hat eine Wärmeleitzahl von 0,31 W/mK und besteht aus Glimmerfraktionen, die zu einem Laminat aufgebaut sind (Brandenburger GL-P). Sie zeichnet sich



durch eine dauerhafte Wärmebeständigkeit bis 500 °C und hohe Druckstabilität aus. Da die Greifaktuatoren den Zuschnitt am Rand greifen und an einem sehr flachen ringförmig geschlossenen Rahmen angeflanscht sowie nach oben offen ausgeführt sind, kann dieser Spannrahmen während des Umformvorganges in der Presse verweilen. Die folgenden Fotos zeigen den Umformprozess des 2D-CF-Zuschnitts zu einem 3D-Preform.

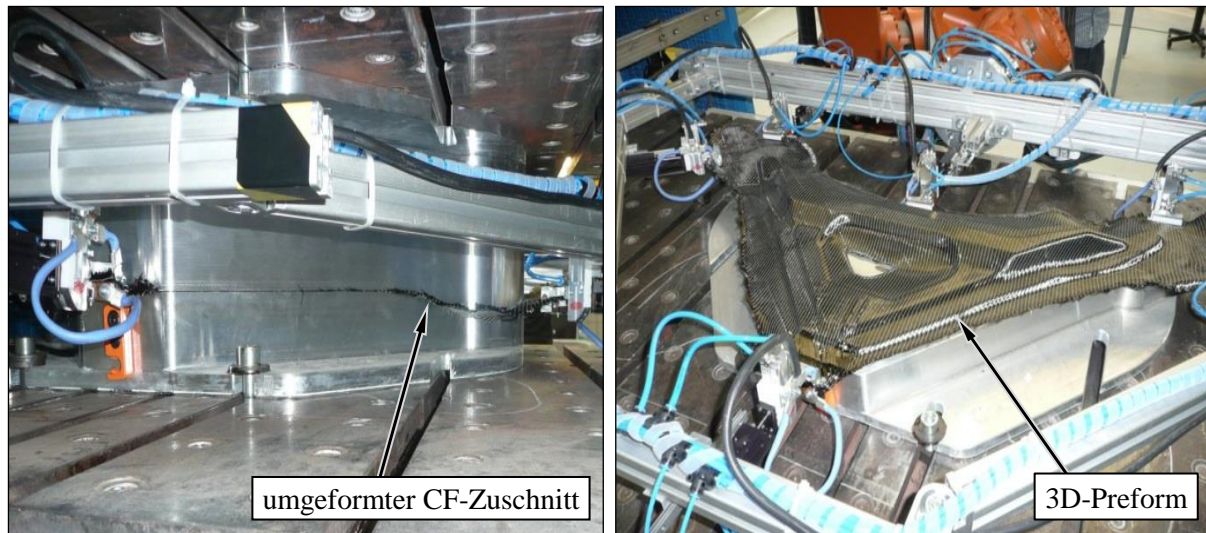


Abbildung 7.4-4: Presse schließt komplett nach Erreichen der Erweichungstemperatur des Binders (links) und Roboter entnimmt erzeugte Preformgeometrie aus Umformwerkzeug (rechts)

Wenn die Schmelztemperatur des thermoplastischen Binders erreicht ist, fährt die Presse die Umformwerkzeuge zusammen und formt dadurch den 2D-Zuschnitt in einen 3D-Preform um (vgl. Abbildung 7.4-4).

Zusätzliche Zykluszeit kann eingespart werden, wenn die Presse das Oberwerkzeug nach Erreichen der Zuschnittposition oberhalb des Unterformwerkzeugs bis kurz vor Kontakt zufährt (Abbildung 7.4-3 (rechts)). Damit kann die Zeit für den Fahrweg der Presse nach Erreichen der Erweichungstemperatur des Faserzuschnitts noch geringfügig reduziert werden. Dies ist nur möglich, da durch die elastische Vorbelastung im Bereich der Lineareinheit pA3 und durch eine zusätzlich angebrachte Zugfeder eine gewisse Nachgiebigkeit der Greif-Bestromungseinheiten realisiert wird. Dadurch kann der Zuschnitt im gespannten Zustand – z. B. zwischen formgebenden Ober- und Unterteilen eines betreffenden Pressenwerkzeuges – gehalten werden, wobei während des Umformprozesses vorteilhaft eine dadurch gegebenenfalls entstehende Längenänderung ausgeglichen werden kann. Ist die notwendige Temperatur im Zuschnitt erreicht, wird die Bestromung abgeschaltet und die Presse schließt komplett (Abbildung 7.4-4 (links)). Die aus Aluminium gefertigten Presswerkzeuge entziehen die Wärme aus dem Zuschnitt, sodass der enthaltene Thermoplastbinder erstarrt und der erstellte Vorformling seine Form beibehält. Für eine Serienanlage müssen die Formwerkzeuge gekühlt werden, um eine sukzessive Aufheizung mit steigender Stückzahl zu verhindern. Bevor die Umformwerkzeuge wieder geöffnet werden, fahren die Klemmeinheiten pA4 gegen die

Ausgleichsführungen FA3, um den Formerhalt des Preforms zu gewährleisten. Dadurch wird der Weg durch die Nachgiebigkeit während des Umformvorgangs fixiert und zugleich die Position des Preforms bezogen zur Formwerkzeuglage übernommen. Der erstellte Vorformling kann sodann von demselben Roboter bzw. Endeffektor wieder aus dem Werkzeug entnommen (Abbildung 7.4-4 (rechts)) und positionsgenau auf dem Ablagetisch abgelegt werden.

Die reine Zykluszeit – d. h. ohne Verschachtelungen oder Anwendung von zeitreduzierenden Parallelprozessen, die mit diesem Fertigungskonzept auf einer Versuchsanlage von der Aufnahme des bereitgestellten kalten 2D-Zuschnitts zur Ablage eines kalten (d. h. bei Raumtemperatur) 3D-Preform durchgeführt werden kann – beträgt 108 s. Über die Integration der Elektroden in den Aufnahmeklemmen kann zudem nach dem Ergreifen des Zuschnittes der Widerstand des Halbzeuges gemessen werden. Über vorher definierte Kalibrierungswerte kann ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt und ein beschädigter oder falscher Zuschnitt identifiziert und sogleich ausgeschleust werden.

## **7.5 Energieverbrauch des optimierten Preformingprozesses**

In der Industrie kommen derzeit hauptsächlich IR-Heizöfen zur Anwendung, um den thermoplastischen Binder des Kohlenstofffaserzuschnittes von Raumtemperatur auf 120 °C aufzuschmelzen. Aus diesem Grund soll der Energieverbrauch gegenüber dem vorgestellten Direktbestromungskonzept mit angepasstem Endeffektor anhand der Demonstratorgeometrie des Strukturbauteils mit dem bereits aufgeführten Lagenaufbau im Folgenden dargestellt werden.

Hierzu werden praktische Aufheizversuche mit identischen CF-Zuschnitten und doppelseitigen IR-Heizfeldern (vgl. Abbildung 2.3-4) sowie mit dem Direktbestromungsprinzip durchgeführt. Durch die gesteuerte Stromeinleitung von 120 A nach dem Schaltungsmuster 02 in die Trockenfasern entsteht weniger Verlustleistung als beispielsweise bei einer doppelseitigen Aufheizung im IR-Heizfeld. Die aus praktischen Versuchen ermittelten Werte sind in Abbildung 7.5-1 zu sehen. In der Grafik sind der theoretisch optimale Abstand der IR-Strahler mit 50 mm sowie der real notwendige Abstand – aufgrund der Höhe des Halterahmens und des benötigten Freiraums für die Kinematik von 200 mm – abgebildet.

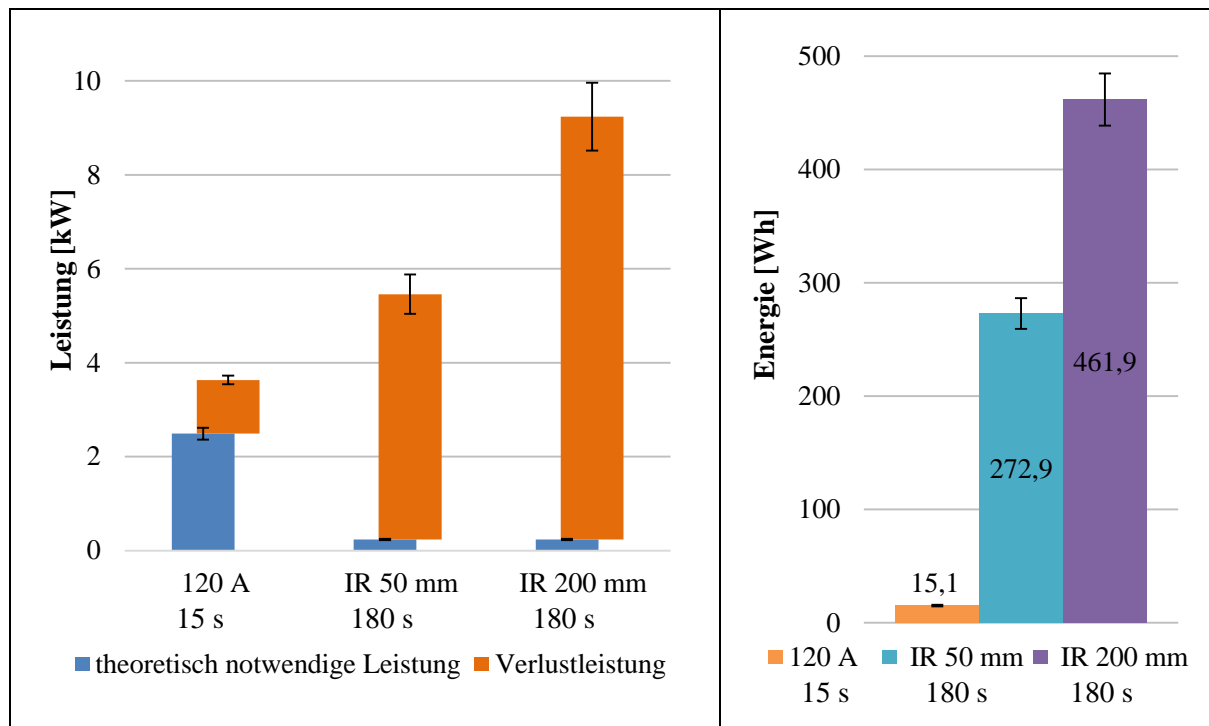


Abbildung 7.5-1: Aufteilung der benötigten Leistungen von Direktbestromung und IR-Heizfeld (links) und Darstellung der notwendigen Energie je Bauteil bis Umformtemperatur erreicht ist (rechts)

Bei der Direktbestromungsvariante wird der Heizvorgang unmittelbar nach dem Ergreifen des Halbzeuges gestartet und kurz vor dem Umformvorgang wieder gestoppt. Ein An- und Abschalten der IR-Heizfelder für kurze Zeitintervalle ist nicht ratsam, da diese für eine optimale Leistung erst auf Temperatur gebracht werden müssen. Durch diese benötigte Vorlaufzeit bis zum Erreichen der optimalen Heizleistung bleiben IR-Heizfelder oftmals in einer Schicht nach der Vorwärmphase konstant eingeschaltet. Aus diesem Grund wird bei der IR-Heizvariante im bestehenden Prozessablauf, noch wesentlich mehr Energie verbraucht, die in dieser Darstellung jedoch nicht einfließt. In einer realen Fertigungsstraße wäre die Energieersparnis bei der Direktbestromung demnach sogar noch höher, als es in dem dargestellten Beispiel aufgeführt ist.

Wird die eingebrachte Leistung mit der Zeit multipliziert, ergibt sich die notwendige Energie zur Erwärmung des Binders, die in Abbildung 7.5-1 (rechts) dargestellt ist. Die durch die Direktbestromung eingesparte Energie je Bauteil liegt hier bei 97 %. Es werden somit nur noch 3 % vom herkömmlichen Energievolumen zur Bauteilerwärmung benötigt. Neben der effizienteren Aufheizung wird Zykluszeit gegenüber anderen Verfahren zudem dadurch eingespart, dass bereits während des Transportes des Halbzeuges mit der Erwärmung begonnen wird. Die Anzahl an nicht wertschöpfenden Transportzeiten reduziert sich somit im Prozessablauf mit diesem Direktbestromungsansatz. Die entwickelte nachgiebige Kinematik – im Zusammenspiel mit der Direktbestromung – ermöglicht zudem die Verkürzung von Transferwegen und Teilprozessschritten. Dies

wird in folgender Gegenüberstellung der einzelnen Prozessschritte der beiden Aufheizvarianten ersichtlich:

IR-Heizfeld	Direktbestromung
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergreifen T-CF Zuschnitt bei RT</li> <li>2. Transfer 1: T-CF in IR-Ofen</li> <li>3. Aufheizen T-CF auf Umformtemperatur</li> <li>4. Überheizen T-CF um Abkühlung durch Transfer zur Presse auszugleichen</li> <li>5. Transfer 2: erwärmtes T-CF zur Umformstation</li> <li>6. Umformung 2D-T-CF in 3D-Preform</li> <li>7. Transfer 3: Entnahme 3D-Preform</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergreifen T-CF bei RT</li> <li>2. Transfer 1: zur Umformstation und zeitgleich Erwärmen T-CF</li> <li></li> <li></li> <li></li> <li>6. Umformung 2D-T-CF in 3D-Preform</li> <li>7. Transfer 3: Entnahme 3D-Preform</li> </ol>

Tabelle 7.5-1: Preformprozessschritte basierend auf herkömmlicher IR-Erwärmung vs. Direktbestromung

Die Gesamtzykluszeit sowie die einzelnen Teilzeiten je Prozessschritt sind in der folgenden Abbildung 7.5-2 aufgeführt und zeigen den deutlichen Unterschied in den jeweils benötigten Zeiten.

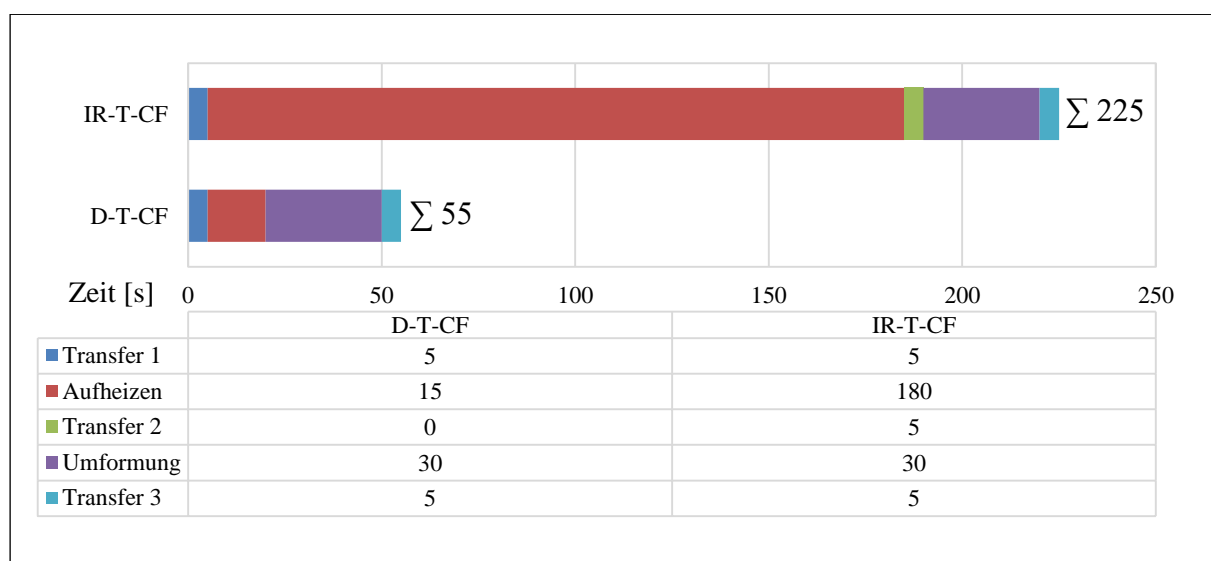


Abbildung 7.5-2: Zykluszeiten zur Erwärmung und Umformung von T-CF mittels doppelseitigem IR-Heizfeld versus Direktbestromung (D)



Es ergibt sich demnach durch Verschachtelung beim IR-Prozess mittels Verwendung von zwei Halterahmen für die Faserzuschnitte eine mögliche Zykluszeit von 185 s (Transfer 1, Umformung und Transfer 3 verlaufen hauptzeitparallel). Selbst dann benötigt eine einfache Fertigungsstraße, die mittels direkter Stromeinleitung in das Halbzeug dessen Erwärmung erzeugt, mit 55 s (29,7 %) nur ein Bruchteil der Zykluszeit für ein Bauteil. Da die Erwärmung bei der Direktbestromung sehr schnell abläuft, ist der Einsatz eines zweiten Endeffektors zur Zykluszeitreduktion möglich, soll hier jedoch nicht betrachtet werden. Die Erwärmung bei der Direktbestromung erfolgt von innen heraus (vgl. Kapitel 6.4 *Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern*) und erwärmt jede einzelne CF-Lage durch die Bestromungssteuerung homogen. Ein Verpressen der trockenen Kohlenstofffasern zur Aufheizzeitreduktion ist bei der IR-Aufheizung nicht möglich und somit ist die Übertragung der von außen aufgebrachten Wärme in das Innere des Lagenaufbaus im Vergleich sehr langsam. Dieser Effekt verstärkt sich zudem mit steigender Lagenanzahl (vgl. Kapitel 6.1 *Thermische Leitfähigkeiten orthogonal zur Faserorientierung*). Außerdem müssen bei der Direktbestromungsvariante die Faserhalbzeuge nicht überhitzt werden, um vor Abkühlraten durch einen zusätzlichen Transfer von dem Ofen zur Umformstation vorzubeugen.

## 8 Homogene Erwärmung von Organoblechen

Die Nutzung der Jouleschen Wärme durch direkte Stromeinleitung in die Kohlenstofffasern wird bereits für Bauteile mit thermoplastischen Matrixsystemen beim sogenannten IMI-Verfahren angewandt [17]. Bei diesem Fertigungsverfahren wird das Faserhalbzeug jedoch erst zwischen zwei Werkzeugformhälften positioniert und im Formwerkzeug durch Direktbestromung erwärmt. Das in Kapitel 7.4 vorgestellte automatisierte Fertigungskonzept für Kohlenstofffaserpreforms mit thermoplastischem Binder soll auf den Umformprozess von Organoblechen übertragen werden, da die Fertigungsschritte, abgesehen von den höheren Temperaturen, identisch sind.

### 8.1 Einflussermittlung von Matrixwerkstoffen

Die Herausforderung bei der Erwärmung von Thermoplasten ist – neben dem homogenen und gesteuerten Aufheizen – eine zu feste Anhaftung an den notwendigen Haltepunkten zu unterbinden, die durch die Erweichung des Materials hervorgerufen wird.

Ein zu festes Anhaften könnte das Lösen des Halbzeuges nach dem Erwärmungsvorgang erschweren oder gänzlich verhindern. Außerdem verursachen diese Anhaftungen Rückstände an den Elektroden und behindern so die Stromeinleitung in das Halbzeug. Da für das Bestromungskonzept eine direkte Kontaktierung des Halbzeuges ratsam ist, der Einsatz von Hilfsstoffen – wie beispielsweise Trennfolien – vermieden und die Zuschnittgröße zur Materialkostenreduktion möglichst klein gehalten werden sollte, wird im Folgenden die Kontaktstelle zwischen Halbzeug und Kupferelektrode im Detail betrachtet.

Matrixaufschmelzungen müssen in diesem Kontaktbereich unterbunden werden, um Anhaftungen zwischen Elektrode und Thermoplasthalbzeug zu vermeiden. Im idealisierten Funktionsaufbau einer Widerstandsheizung beginnt die Erwärmung erst direkt nach der Stromeinleitung vom Elektrodenkontakt zu dem Fasermaterial und endet kurz vor der Stromausleitung von den Kohlenstofffasern zu dem Elektrodenkontakt. Bedingt dadurch, dass die Kupferkontakte ein Teil der erzeugten Wärme in die elektrischen Zuleitungen und deren angeschlossenen elektronischen Komponenten leiten, wird die unmittelbare Schnittstelle stückweise gekühlt. Die Herausforderung bei der angestrebten lösbaren Kontaktierung von Faserverbundwerkstoffen besteht in einer guten Stromeinleitung in die Kohlenstofffasern zur Reduktion des Übergangswiderstandes und der damit verbundenen ungewollten Wärmeentwicklung (vgl. Kapitel 4.5 *Wärmeentwicklung im Kontaktierungsbereich*).

Demzufolge ist eine möglichst große Wirkfläche der Elektroden ratsam. Zur Erwärmung der Organobleche werden die Elektroden aus Kupfer (Cu-DHP) mit einer theoretischen Kontaktfläche von je 3.000 mm<sup>2</sup> (Länge: 100 mm, Breite: 30 mm) gefertigt. Da die verwendeten Proben eine maximale Breite von ca. 100 mm aufweisen, kann der Strom über dessen komplette Breite eingeleitet werden. Außerdem wird ein relativ hoher Kontaktierungsdruck von 1,4 N/mm<sup>2</sup> (vgl. Kapitel 6.2 *Elektrodenkonfiguration*) eingestellt. Die Oberflächen der Kupferelektroden sind als ebene Fläche mit  $R_z = 0,4$  gefertigt. Die umlaufenden Kanten der Kontaktflächen zum Organoblech sind mit einem Radius von 4 mm abgerundet, um die Entstehung von Druckpunkten im Randbereich der Kupferplatten und die damit verbundene Provokation von lokalen Temperaturerhöhungen zu vermeiden. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 8.1-1 eine schematische Schnittdarstellung mit dem prinzipiellen Einfluss der Randgestaltung der Kontaktierungsgeometrie auf die Gleichmäßigkeit der Stromein- bzw. Stromausleitung im Bezug zum Organoblech.

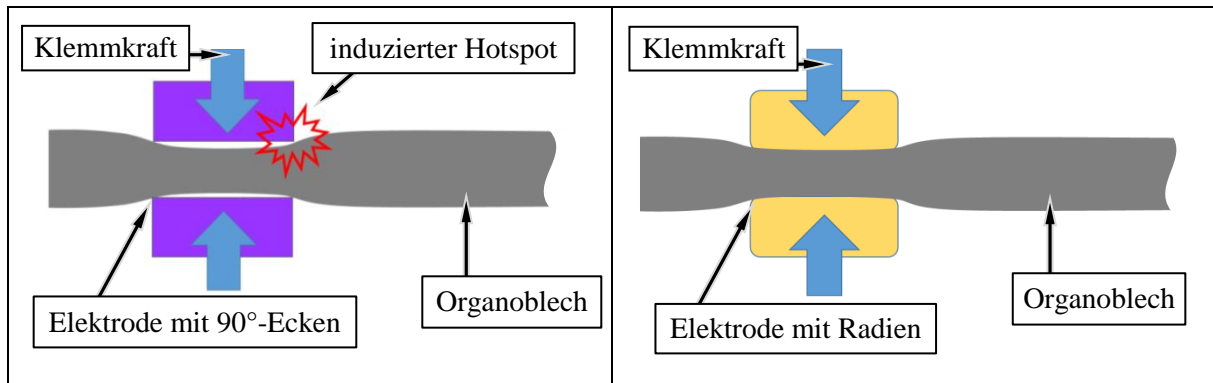


Abbildung 8.1-1: Einfluss der Kontaktierungsgeometrie auf den Übergangswiderstand

Die gleiche Problematik ergibt sich, wenn die Kontaktierungsflächen größer als das zu erwärmende Organoblech sind und dessen Schnittkanten nicht entgratet sind. Die hervorstechenden, freiliegenden Kohlenstofffasern im Randbereich des Halbzeugs können den eingeleiteten Strom besser leiten als die mit Matrix in Faserquerrichtung kontaktierten. Dadurch ergeben sich stark unterschiedliche Übergangswiderstände, was bei den Bereichen mit niedrigeren Widerstandswerten unweigerlich zu lokalen Temperaturerhöhungen, sogenannte Hotspots, führt. Bei biegeschlaffen Trockenfasern tritt dieser Effekt durch die Kompaktierbarkeit des Halbzeuges nicht auf. Diese aufgeführten Geometrieanspassungen der Elektroden werden bei den durchgeführten Bestromungsversuchen von Organoblechen angewandt; ein Anheften des über die Schmelztemperatur erwärmten Organoblechs konnte nicht beobachtet werden. Abbildung 8.1-2 zeigt ein repräsentatives Organoblech bei Raumtemperatur, das mittels Bestromung über dessen Erweichungstemperatur erwärmt wurde.

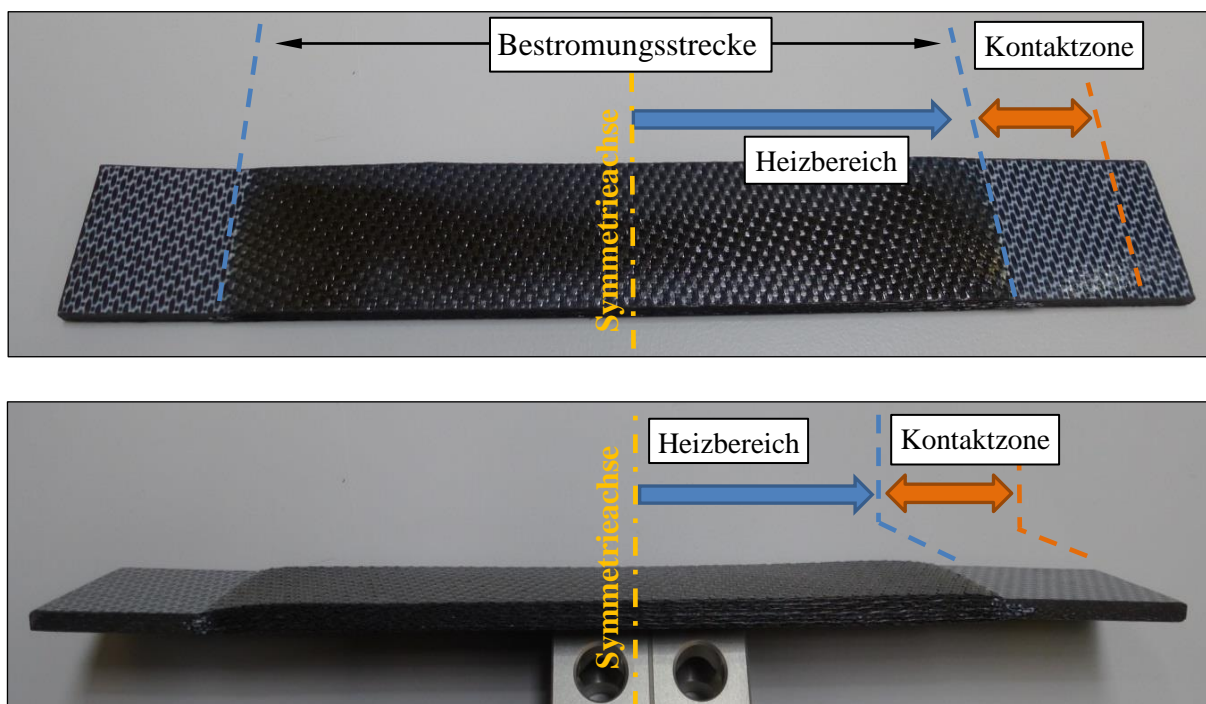


Abbildung 8.1-2: Zustand eines Organoblechs mit PPS-Matrix nach einer Direktbestromung

Deutlich ist zu erkennen, dass keine Aufschmelzung des Kontaktierungsbereichs stattgefunden hat, obwohl das Organoblech zwischen den Kupferelektroden über die Erweichungstemperatur erwärmt wurde. Es ist kein Unterschied bzgl. des Aufschmelzverhaltens – weder im Kontakt noch im Erwärmungsbereich zwischen einem PPS- und PEEK-Material – zu erkennen. Neben den getroffenen Maßnahmen zur Stromeinleitungsoptimierung tragen die gute thermische Leiteigenschaft der Kupferkontakte und deren angeschlossene Peripherie dazu bei, einen Teil der entstehenden Wärme aus der Kontaktzone zu ziehen. Als elektronische Isolier- und gleichzeitig thermische Dämmschicht wurde eine 4,5 mm dicke Zwischenplatte – basierend auf hochverdichteten Magnesiumsilikaten (BRA-BOARD® HT 175) mit einer Wärmeleitzahl von 0,22 W/mK – zwischen Kupferelektrode und Struktur des Halterahmens appliziert. Dadurch können Wärmeverluste durch Wärmeübertragung in den Endeffektor minimiert werden. In der folgenden Nahaufnahme (Abbildung 8.1-3) ist ein Wärmebild von einem eingespannten Organoblech (rechte Kontaktklemmen) zu erkennen, das beidseitig längs mit Strom durchflutet und dadurch aufgeheizt wurde. Die Wärmeentwicklung ist dreifach spiegelsymmetrisch (über X-, Y- und Z-Achse), da die obere und untere Elektrode zur Stromein- und Stromausleitung bei dieser Wärmebildaufnahme zur Anwendung kamen.

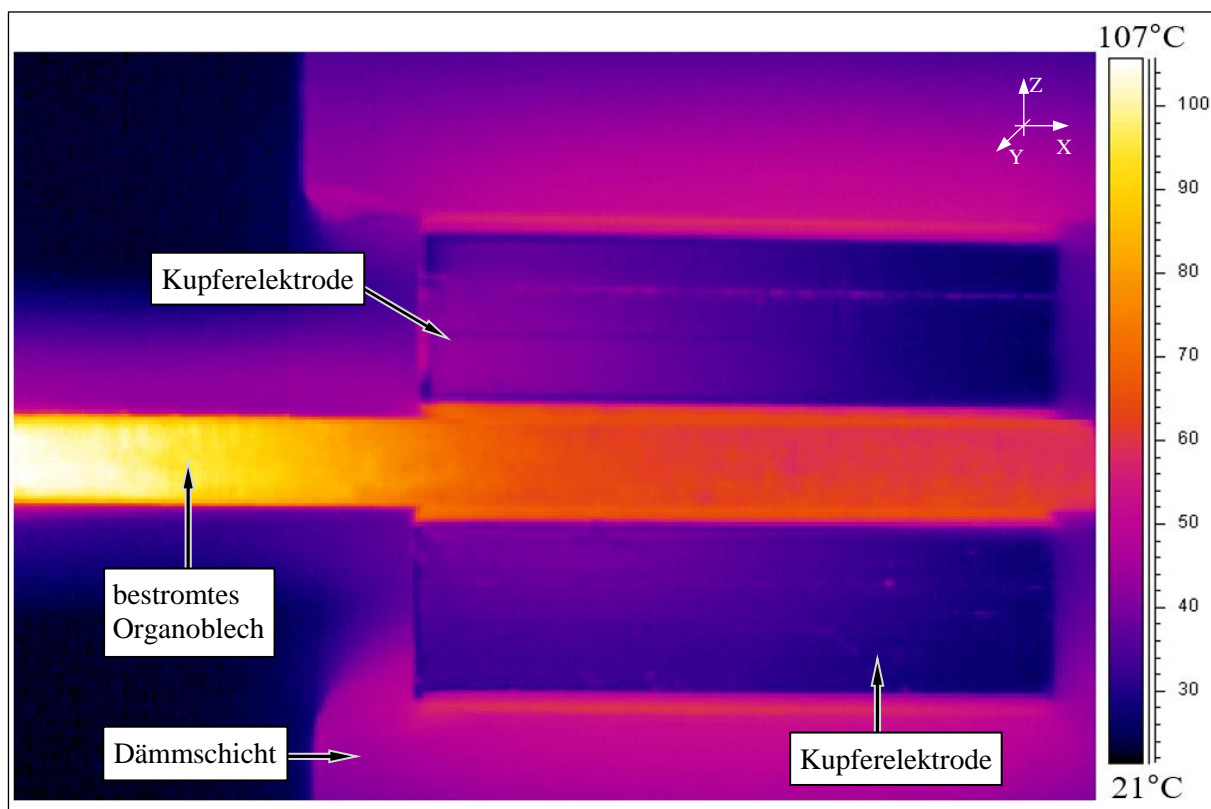


Abbildung 8.1-3: Wärmedetektion der rechten Klemmeinheit eines bestromten Organoblechs

Die Wärmeentwicklung findet primär zwischen den Kupferelektroden einer Ebene statt. Auf dem hier dargestellten Wärmebild ist eine Temperaturdifferenz von ca. 50 K zwi-

schen dem durch die Kontaktklemmen eingespannten und dem nach außen freien Endbereich des Halbzeugs erkennbar. Bei höheren Bestromungsstärken mit entsprechender Haltezeit bis zum Erreichen der Erweichungstemperatur der Thermoplastmatrix ist die Temperaturdifferenz noch ausreichend hoch, sodass kein Aufschmelzen innerhalb der Klemmen erfolgt (vgl. Abbildung 8.1-2). Ausschlaggebend hierfür sind die Aufheizgeschwindigkeiten und die Wärmeabführung der Kupferelektroden, da das durch Stromeinleitung aufgeheizte Organoblech zwar primär mittig zur Wärmeentwicklung gezwungen wird, diese sich jedoch durch Wärmeleitung über die Zeit im ganzen Halbzeug ausbreitet. Demzufolge würde eine initiierte, langsame Erwärmung zur Erweichung der thermoplastischen Matrix im Klemmbereich führen. Eine sehr langsame Erwärmung mittels des hier thematisierten Konzeptes wäre also auch unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung von Anhaftungen durch Aufschmelzungen der Matrix im Klemmbereich nicht ratsam. In Abbildung 8.1-4 sind die sich ergebenden Erwärmungskurven einer CF/PPS-Probe (CFPS675) bei unterschiedlich starker Stromstärke aufgetragen. Die verwendeten Thermoplastprobenkörper bestehen aus 14 Lagen (TORAYCA: T300J B – 3000 – 40 B) mit PPS-Matrix (FORTRON 0214) und werden in dem bereits beschriebenen Endeffektor von Raumtemperatur auf 200 °C aufgeheizt. Die Bestromungsstrecke betrug dabei 200 mm.

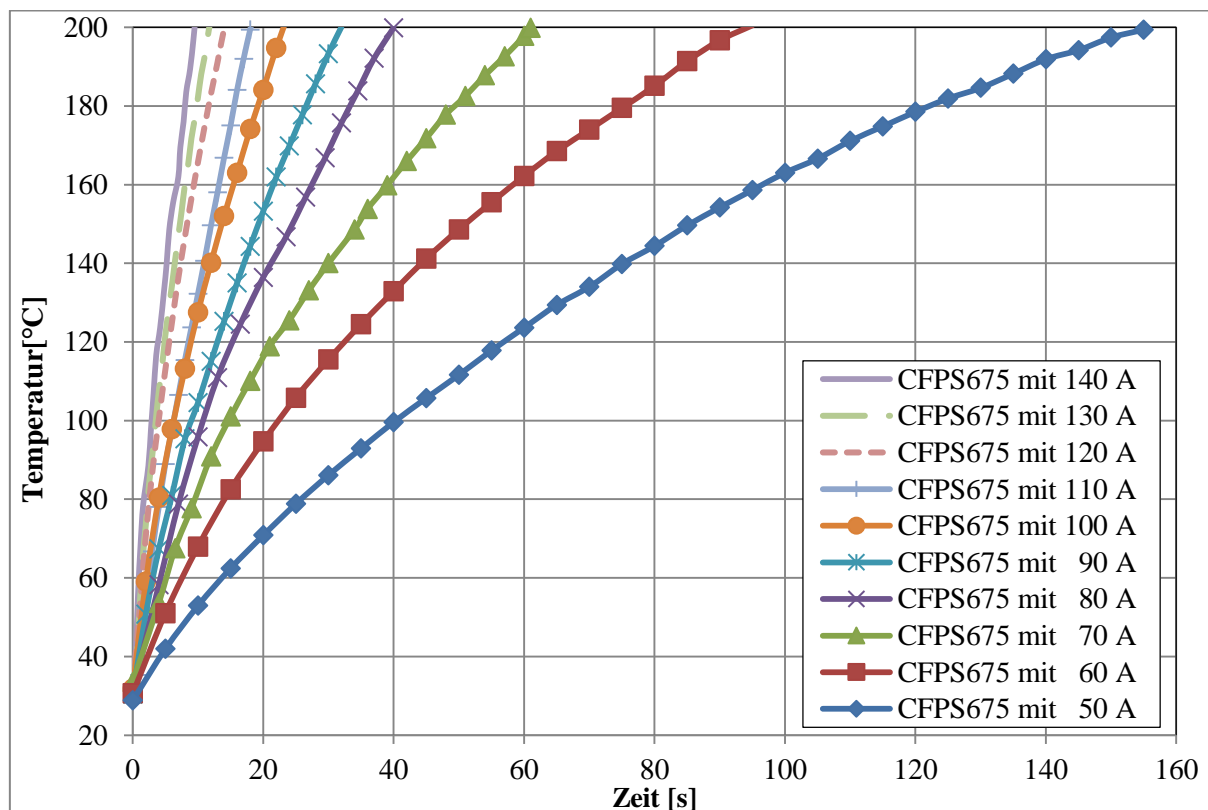


Abbildung 8.1-4: Aufheizkurven einer PPS-Probe bei unterschiedlichen Stromstärken

Die gezeigten Aufheizraten konnten mit identischer Tendenz in weiteren Versuchen an unterschiedlichen Probengeometrien und Lageraufbauten wiederholt registriert werden.

## 8.2 Organoblech mit Kohlenstofffasergelegen

Die Kohlenstofffasern der bisher untersuchten Organobleche waren als Gewebehalbzug in die Matrix eingebettet. Dies führt bei einer Erwärmungsstrategie mittels Direktbestromung aufgrund der zahlreichen Überkreuzungspunkte der Kohlenstofffasern zu einem sehr homogenen Erwärmungsergebnis. Abbildung 8.2-1 (links) zeigt den Versuchsaufbau zur Direktbestromung von derartigen Organoblechen. Der verwendete PPS-Faserhalbzeug (Probe CFPS675, Geometriedaten vgl. Anhang 13.4 *Prüfkörper: Kohlenstofffasergewebe in Thermoplastmatrix*) wird beidseitig zwischen ebenen Kupferkontaktleisten (je 100 mm x 30 mm Grundfläche) mit 1,4 N/mm<sup>2</sup> eingespannt. Der Abstand der Kontaktklemmen ergibt die Bestromungsstrecke und beträgt bei diesem Versuch 200 mm. Die Abbildung 8.2-1 (rechts) zeigt das sich einstellende Erwärmungsbild des Probenkörpers, nachdem ein Strom von 110 A über 12,78 s eingeleitet wurde.

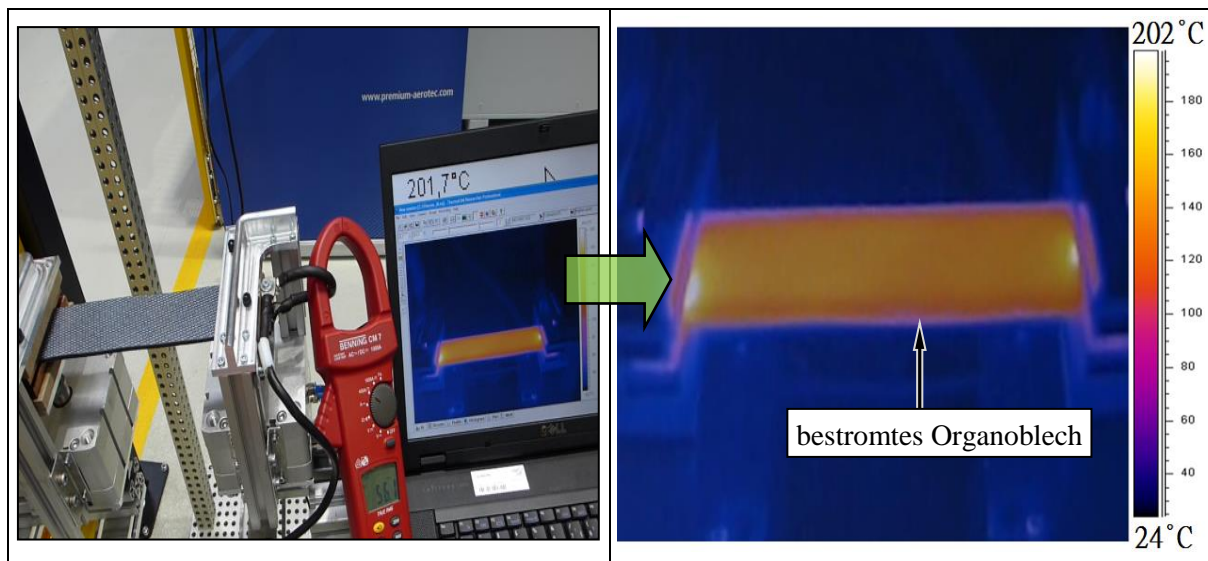


Abbildung 8.2-1: PPS-Organoblech wird mit 110 A bestromt (links) und sich einstellende Wärmeverteilung des PPS-Organoblechs nach 12,78 s (rechts)

In dem überwiegenden Bereich des Organoblechs sind Temperaturdifferenzen von lediglich  $\pm 7$  K auszumachen, während es im Bereich der Kontaktklemmen immer wieder zu kleinen Hitzeansammlungen kommt, die eine Temperaturerhöhung gegenüber der Restfläche von ca. + 20 K aufzeigen. Diese Temperaturvarianz erstreckt sich jedoch lediglich auf eine Länge von maximal 5 mm von der Kontaktierungszone. Da das Halbzeug nach der Umformung zum Bauteil noch auf Endkontur getrimmt werden muss, kann dieser Bereich – wenn dies denn notwendig sein sollte – abgetrennt werden.



Organobleche werden häufig aus unidirektionalen Faserlagen aufgebaut. Mit einer Doppelbandpresse werden nebeneinander angeordnete UD-Carbonfasern mit thermoplastischer Matrix übereinander nach zuvor definiertem Lagenaufbau gestapelt und unter hohem Druck und hoher Temperatur konsolidiert. Dieses Material soll im Folgenden bzgl. einer Erwärmung mittels Direktbestromung untersucht werden. Als Testmaterial werden PA 66-Probenkörper (Celstran® CFR-TP PA 66 CF60-02) mit 60 % Faservolumenanteil und den Abmaßen von 100 mm x 30 mm x 10 mm und folgender Konfiguration getestet. Es werden zwei Lagenkonfigurationen (vgl. Abbildung 8.2-2) untersucht. Der spezifische Durchgangswiderstand bei 23 °C liegt bei PA 66 bei  $>10^{14} \Omega\text{cm}$ , der spezifische Oberflächenwiderstand bei  $>10^{13} \Omega/\text{sq}$  [113]. Ein signifikanter Einfluss der Matrix auf die Widerstandserwärmung kann somit ausgeschlossen werden. Die Bestromungsstrecke beträgt wiederum 200 mm.

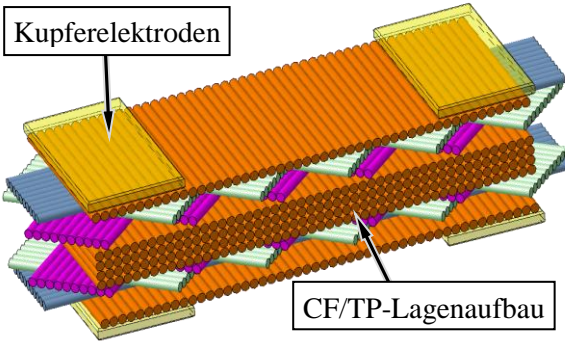
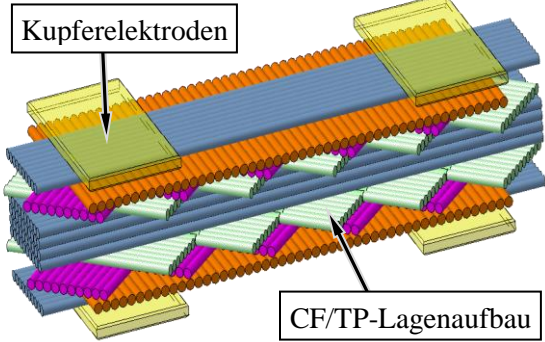
Testlagenaufbau CF/PA 66_90°	Testlagenaufbau CF/PA 66_0°																								
 <p>Dicke des Lagenaufbaus 1,92 mm  Lagendicke 0,16 mm  Anzahl der Lagen 12 Stk.</p> <p><i>Lagenaufbau:</i></p> <table> <tr><td>Lage 1</td><td>90°</td></tr> <tr><td>Lage 2</td><td>0°</td></tr> <tr><td>Lage 3</td><td>45°</td></tr> <tr><td>Lage 4</td><td>-45°</td></tr> <tr><td>Lage 5</td><td>90°</td></tr> <tr><td>Lage 6</td><td>90°</td></tr> </table> <p>-----</p> <p>Symmetrieachse des Lagenaufbaus</p>	Lage 1	90°	Lage 2	0°	Lage 3	45°	Lage 4	-45°	Lage 5	90°	Lage 6	90°	 <p>Dicke des Lagenaufbaus 1,92 mm  Lagendicke 0,16 mm  Anzahl der Lagen 12 Stk.</p> <p><i>Lagenaufbau:</i></p> <table> <tr><td>Lage 1</td><td>0°</td></tr> <tr><td>Lage 2</td><td>90°</td></tr> <tr><td>Lage 3</td><td>-45°</td></tr> <tr><td>Lage 4</td><td>45°</td></tr> <tr><td>Lage 5</td><td>0°</td></tr> <tr><td>Lage 6</td><td>0°</td></tr> </table> <p>-----</p> <p>Symmetrieachse des Lagenaufbaus</p>	Lage 1	0°	Lage 2	90°	Lage 3	-45°	Lage 4	45°	Lage 5	0°	Lage 6	0°
Lage 1	90°																								
Lage 2	0°																								
Lage 3	45°																								
Lage 4	-45°																								
Lage 5	90°																								
Lage 6	90°																								
Lage 1	0°																								
Lage 2	90°																								
Lage 3	-45°																								
Lage 4	45°																								
Lage 5	0°																								
Lage 6	0°																								

Abbildung 8.2-2: Probenkonfiguration für Bestromungsversuche von CF/PA 66-Halbzeugen

Die Herausforderung für ein homogenes Erwärmungsergebnis bei dieser Halbzeugart besteht in der gleichmäßigen Stromeinleitung über die vollständige Breite des Organoblechs.

Dies wird neben dem UD-Lagenaufbau durch Inhomogenitäten im Organoblech (z. B. Poren, Delaminationen, eingeschlossene Fremdkörper) erschwert. Sind die Kohlenstofffasern bei der Ablage im Herstellungsprozess nicht mit ausreichendem Anpressdruck, der notwendigen Temperatur oder der entsprechenden Vorspannkraft verarbeitet worden, so kann dies zu Aufwölbungen bzw. Ablösungen führen. Eine weitere Schwierigkeit stellen herunterfallende Fremdkörper dar, die zwischen die Lagen gelangen und so mit einlaminieren werden. Ein anderes Problem entsteht bei der Herstellung, wenn die Kohlenstofffasern nicht mit ausreichendem Abstand zueinander abgelegt werden. Dann kommt es in den Überlappungsbereichen stellenweise zu Dickenschwankungen des Materials. Zwei dieser Fehlstellen wurden in den verwendeten Versuchsproben identifiziert und sind in Abbildung 8.2-3 zu sehen.

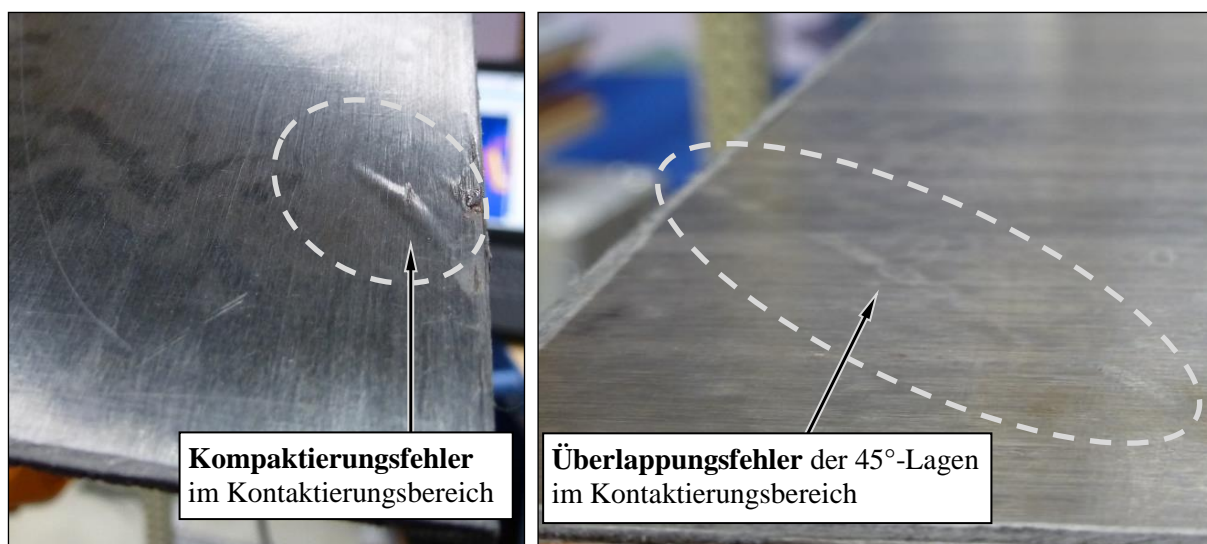


Abbildung 8.2-3: Fehlstellen im Halbzeug führen zu einer inhomogenen Stromeinleitung

Derartige Fehlstellen behindern eine homogene Temperierung. Dies gilt vor allem dann, wenn Fehler im Kontaktierungsbereich auftreten, die dazu führen, dass sich die Materialstärke lokal vergrößert. Durch die starren Kontaktierungsflächen und den entsprechend hohen Kontaktierungsdruck bei der Direktbestromung kommt es dann dort zu örtlich verbesserten Übergangswiderständen und somit zur Induktion von lokalen Temperaturerhöhungen (vgl. Kapitel 4.4 *Kontaktierungsvarianten*). Thermographiebilder von Organoblechen, die kurzzeitig mit einer Direktbestromung erwärmt wurden, könnten folglich für eine Qualitätskontrolle der Halbzeuge genutzt werden.

In den Versuchsablauf werden als erstes die UD-Thermoplastproben mit dem Testaufbau 90° (CF/PA 66\_90°) zwischen die Kupferelektroden eingespannt und bestromt. Der



Vorteil bei diesem Lagenaufbau in Bezug auf die beidseitige Stromeinleitung zur Wärmeerzeugung durch das Prinzip der Widerstandsheizung ist, dass die primär stromführenden 0°-Lagen nicht direkt kontaktiert werden. Die obenliegenden 90°-Lagen verteilen den über sie von den Kupferkontaktklemmen eingeleiteten Strom gleichmäßig auf die darunter liegenden 0°-Lagen. Des Weiteren ist bei dieser Anordnung der CF-Lagen vom Vorteil, dass die innen liegenden 0°-Lagen von den darüber liegenden Kohlenstofffasern samt Matrix abgedeckt sind. Dies führt dazu, dass eine ungleichmäßige Wärmeverteilung im Inneren des Lagenaufbaus teilweise durch diese Abdeckung in Breitenrichtung verteilt wird. Die Erwärmungsversuche mit dem bekannten Versuchsaufbau zeigen homogene Wärmebilder bei dem CF/PA 66\_90° Testmaterial, wie in Abbildung 8.2-4 zu sehen ist.

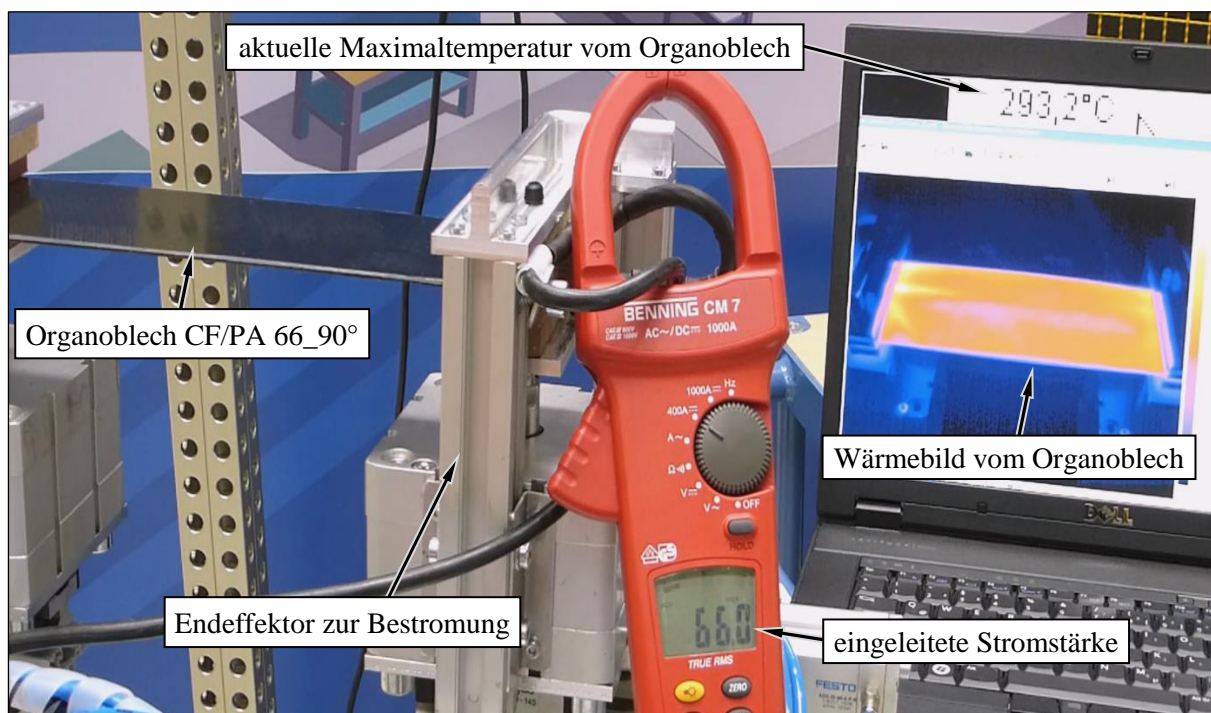


Abbildung 8.2-4: Versuchsstand zum Widerstandsheizen von in thermoplastischer Matrix eingebetteten Kohlenstofffasergelegen mit außen liegenden 90°-Faserlagen

Ähnlich wie beim Gewebe mit thermoplastischer Matrix kommt es bei der Erwärmung zu leichten Aufwölbungen der Probenkörper, was sich auch hier mit dem Lösen der induzierten Spannungen beim Herstellungsprozess des Halbzeuges sowie den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Faser, deren Orientierung und Matrix erklären lässt. Verstärkt wird dieser Effekt durch den Temperaturgradienten in Dickenrichtung des Halbzeuges. In Abbildung 8.2-5 ist der Probenkörper CFPSB05 (Details vgl. Anhang 13.5 *Prüfkörper: Kohlenstofffasergelege in Thermoplastmatrix*) dargestellt, der durch eine direkte Stromeinleitung von 66 A auf 270 °C erwärmt wurde. Es konnte ein mittlerer Dickenzuwachs der 1,9 mm starken Organobleche auf ca. 5 mm ermittelt werden.

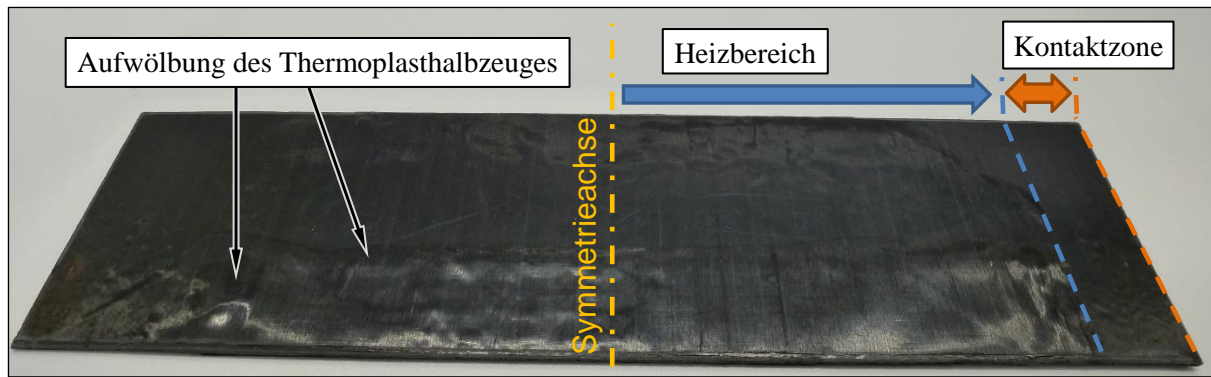


Abbildung 8.2-5: CF/PA 66-Halbzeug nach der Erwärmung mittels Direktbestromung über dessen Erweichungstemperatur

Eine Erwärmung mittels Direktbestromung ist somit möglich und eine spezielle Stromflusssteuerung, die eine homogene Erwärmung unterstützen könnte, ist für diesen Aufbau nicht zwingend erforderlich.

Eine gleichmäßige Temperaturverteilung mit den CF/PA 66<sub>0°</sub>-Probenmaterial bei identischem Versuchsaufbau ist demgegenüber wesentlich schwerer zu realisieren. Dies liegt an dem planar um 90° gedrehten Lagenaufbau. Besonders die oberliegenden 0°-Kohlenstofflagen, die den direkten Kontakt zu den stromführenden Elektroden haben und somit maßgeblich für die Stromein- und Stromausleitung verantwortlich sind, erschweren eine gleichmäßige Temperaturverteilung bei den vorgegebenen Randbedingungen bzgl. einer lösbaren Verbindung zwischen Halbzeug und Organoblech. In Abbildung 8.2-6 ist ein repräsentatives Ergebnis des Materials nach einem Bestromungsdurchgang von 20 s bei 80 A abgebildet.

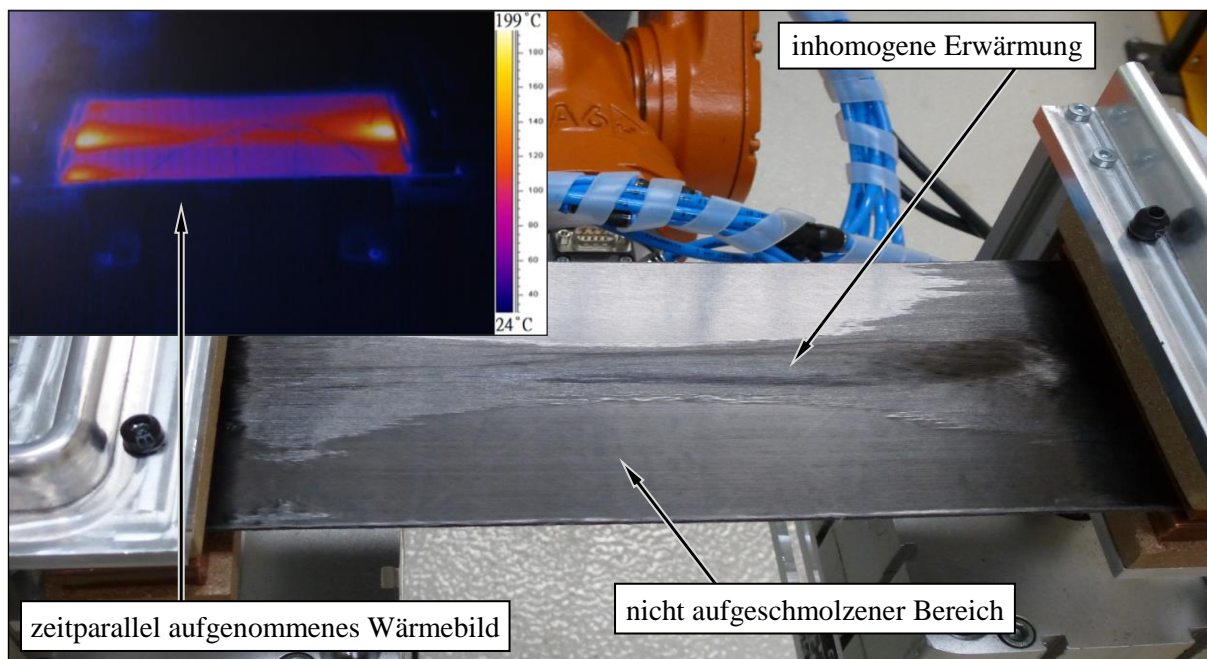


Abbildung 8.2-6: Bestromung einer CF/PA 66<sub>0°</sub>-Probe ohne spezieller Steuer- oder Regelungseinheit

Deutlich ist in der Abbildung 8.2-6 die inhomogene Erwärmung des Halbzeuges im Wärmebild sowie direkt am Bauteil zu erkennen. Es sind Temperaturunterschiede vom wärmsten zum kältesten Bereich von 160 °C zu beobachten. Dieses Phänomen lässt sich mit einer ungleichmäßigen Stromeinleitung durch differierende Übergangswiderstände in die parallel angeordneten 0°-Kohlenstofffasern an der Oberfläche des Testkörpers erklären. Die Übergangswiderstände sind lokal unterschiedlich, da sich herstellungsbedingt marginale Dickungsschwankungen der Matrix, die sich zwischen Elektrode und Kohlenstofffaser befindet, einstellen. Verantwortlich hierfür ist neben den bereits erwähnten Ablegeungenauigkeiten bei der Herstellung des Halbzeuges die Varianz einzelner Kohlenstofffasern in deren Umfangsdurchmesser.

Die ungleichmäßige Aufheizung kann weder durch Änderung des Kontaktierungsdrucks noch durch die beaufschlagte Stromstärke merklich positiv beeinflusst werden. Eine definiert pulsierende Stromeinleitung kann das Erwärmungsergebnis durch gezielte Zwischenabkühlphasen verbessern. Dabei werden die erzeugten lokalen Temperaturerhöhungen in ihrer Intensität durch Reduktion der Bestromungsdauer abgemildert und die Abschaltzeiten zur Temperaturegalisierung in Richtung der Breite und Tiefe des Faserverbundes genutzt. Eine derartige Hysteresensteuerung ist mit der entwickelten Steuerung prinzipiell möglich und wurde auch getestet. Zwar ist das Ergebnis positiv, jedoch ist die Methode sehr aufwendig und verlängert die Gesamtzykluszeit des Fertigungsprozesses. Sie ist somit nicht zielführend und soll hier folglich keine weitere Beachtung finden.

Ein anderer Ansatz stellt die gezwungene Aufstreuung des Elektronenflusses bei der Durchströmung des kontaktierten Faserverbundkörpers dar. Dabei wird der Stromfluss durch das aufgezwungene Durchfließen jeder Faserlage und Faserorientierung immer wieder neu aufgeteilt und in der Breite aufgestreut. Das erzeugte Wirkprinzip ist dabei annähernd dem Stromfließweg in einem Gewebehalbzeug angeglichen, das angesichts der untereinander verwobenen Fasern zu einer homogenen Stromverteilung in Tiefen- sowie Breitenrichtung und damit zu einer gleichmäßigen Erwärmung führt. Eine derartige Aufstreuung kann bei diesem vorliegenden anspruchsvollen Lagenaufbau bzgl. Direktbestromung erzwungen werden, wenn die Kontaktierungsflächen wechselseitig quer zum Lagenaufbau verschaltet werden. Hierzu wird jeweils der längste Weg von einer Elektrode durch das Halbzeug zur nächsten Elektrode mit Strom durchflossen. Die schematische Abbildung 8.2-7 zeigt dieses Kontaktierungsprinzip anhand des vorliegenden Lagenaufbaus CF/PA 66\_0°.



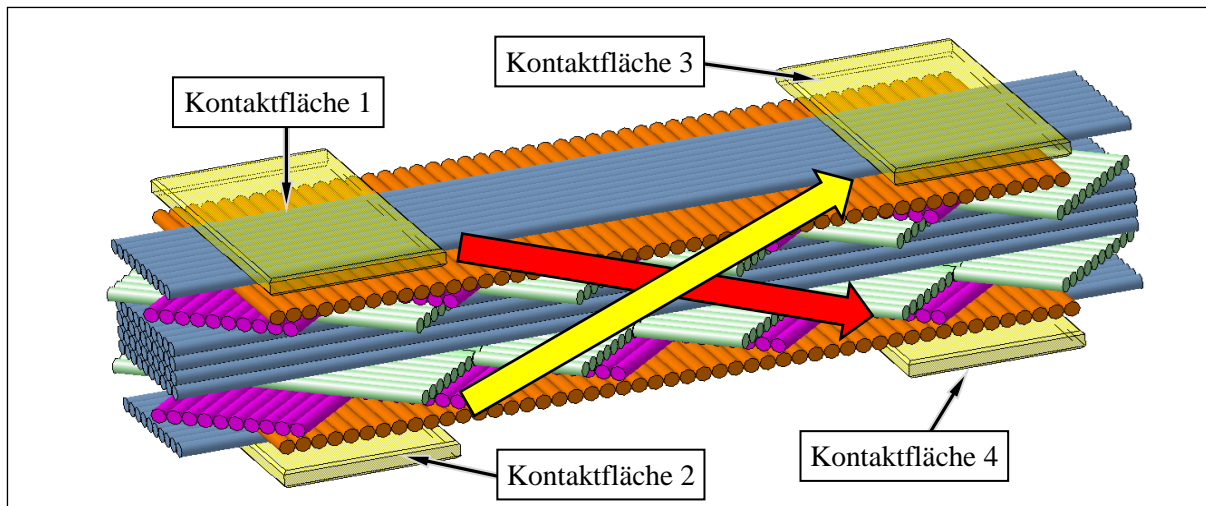


Abbildung 8.2-7: Kreuzkontaktierungsmethode für eine homogene Erwärmung mittels Direktbestromung von Lagenaufbauten mit außen liegenden 0°-Faserorientierungen

Deutlich ist zu erkennen, dass durch die wechselseitige Stromeinleitung – beginnend mit der Verschaltung von Kontaktfläche 1 zur Kontaktfläche 4 und nach einer Haltezeit  $\Delta t$  – die direkte Umstellung auf eine Stromeinleitung von Kontaktfläche 2 zu Kontaktfläche 3 die Elektronen durch die unterschiedlichsten Faserorientierungen je Lagenaufbau gezwungen werden. Dabei findet eine Aufstreuung der Elektroden in Breitenrichtung statt, was zu einer homogenen Erwärmung führt. Bei sehr dünnen Halbzeugen, wie im hier vorliegenden Fall, ist eine einseitige Querbestromung ausreichend. Es werden mehrere Probenkörper mit dem entsprechenden Lagenaufbau über eine kreuzweise Stromeinleitung auf Erweichungstemperatur erwärmt, um die theoretische Überlegung zu prüfen. Das Aufheizverhalten mit dieser Kreuzbestromung ist anhand eines Beispiels in der folgenden Abbildung 8.2-8 zu erkennen.

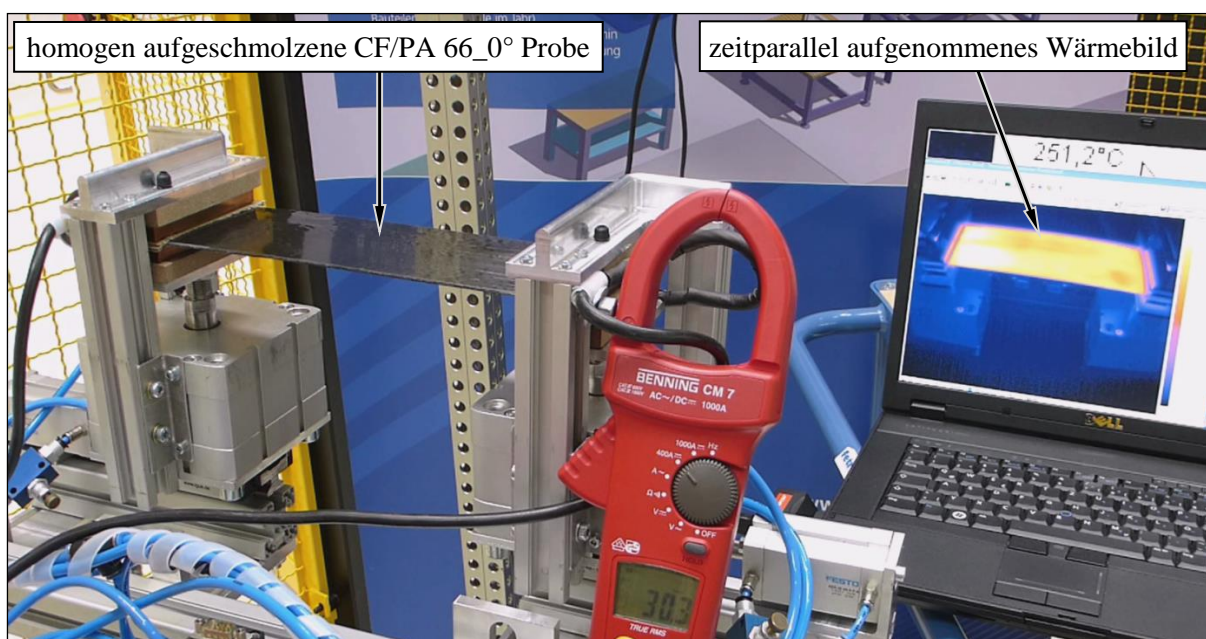


Abbildung 8.2-8: Anwendung der entwickelten Kreuzkontaktierungsmethode

Die resultierende Erwärmung der Thermoplastprobe ist mit einer Schwankung der Temperaturverteilung um ca. 13 K sehr homogen. Abbildung 8.2-9 zeigt den aufgezeichneten Verlauf von fünf diagonal auf der CF/PA 66\_0°-Probe platzierten Temperatursensoren. Die äußersten Temperaturfühler CH1 und CH5 zeigen leicht erhöhte Werte, da sich im unmittelbaren Bereich nahe der Elektroden durch den Übergangswiderstand eine erhöhte Temperaturentwicklung einstellt. Der Unterschied der mittleren Temperatursensoren CH2 und CH4 gegenüber CH3 ist nur geringfügig. Aufgrund der relativ kleinen Probengröße ist eine Beeinflussung durch die erhöhten Temperaturen am Randbereich nicht auszuschließen.

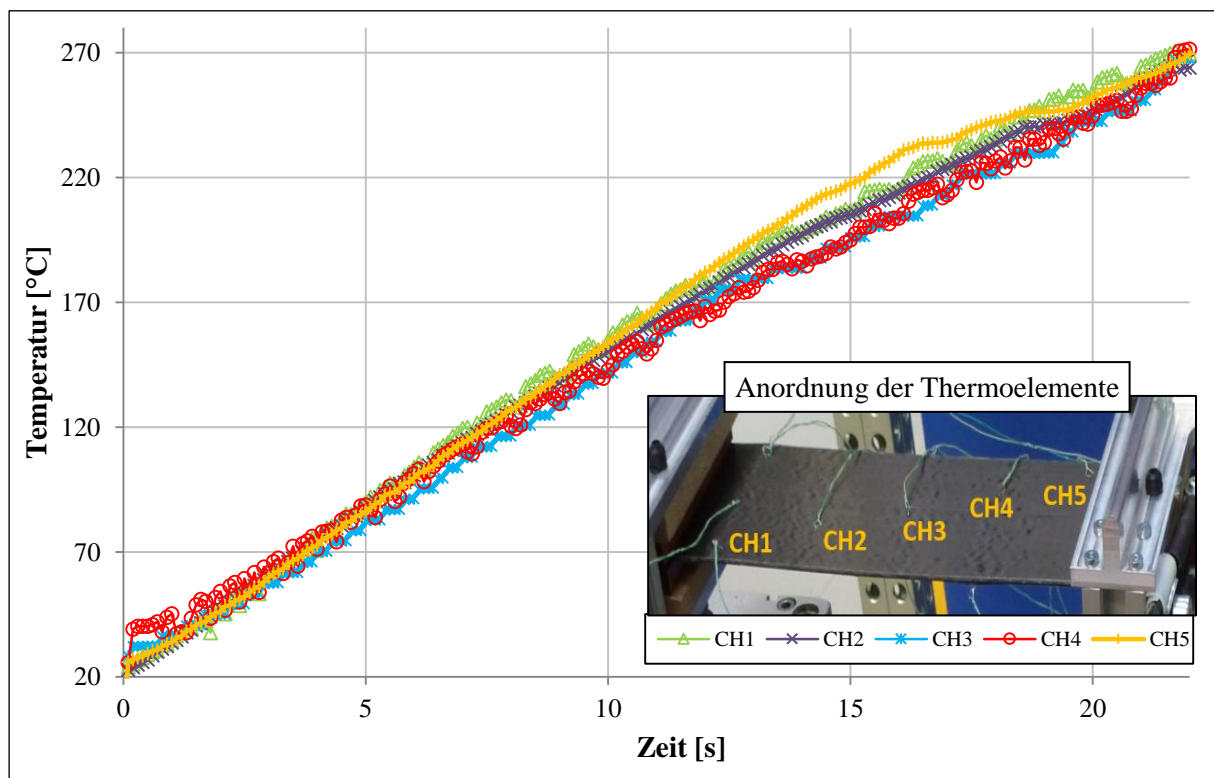


Abbildung 8.2-9: Temperaturverteilung von diagonal auf den Probenkörper platzierten Temperatursensoren

In Probenbreitenrichtung zeigen die Werte für CH1 und CH5 sowie CH2 und CH4 ein spiegelsymmetrisches Verhalten. Es kann festgehalten werden, dass mit diesem gefundenen Lösungsansatz auf eine komplexe und zeitintensive Hysterresenansteuerung der Kontaktierungselemente verzichtet werden kann.

### 8.3 Optimierter Umformungsprozess von Organoblechen

Es wurde gezeigt, dass die Bestromungsvariante zur Erzeugung der notwendigen Prozessstemperatur für den Umformvorgang auch für Kohlenstofffasern mit thermoplastischer Matrix eine optimierte Lösung darstellen. Im Folgenden wird basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen eine Ergänzung zu dem im Kapitel 7.4 dargestellten Fertigungskonzept für die Bauteilherstellung mit Organoblechhalbzeugen anhand eines entsprechend automatisierten Fertigungskonzeptes erläutert (vgl. [116]).

Als Demonstratorbauteil wird eine frei definierte Omegakontur mit einer maximalen Breite von 70 mm gewählt. Die Bauteilabmaße sind in der folgenden Abbildung 8.3-1 zu sehen.

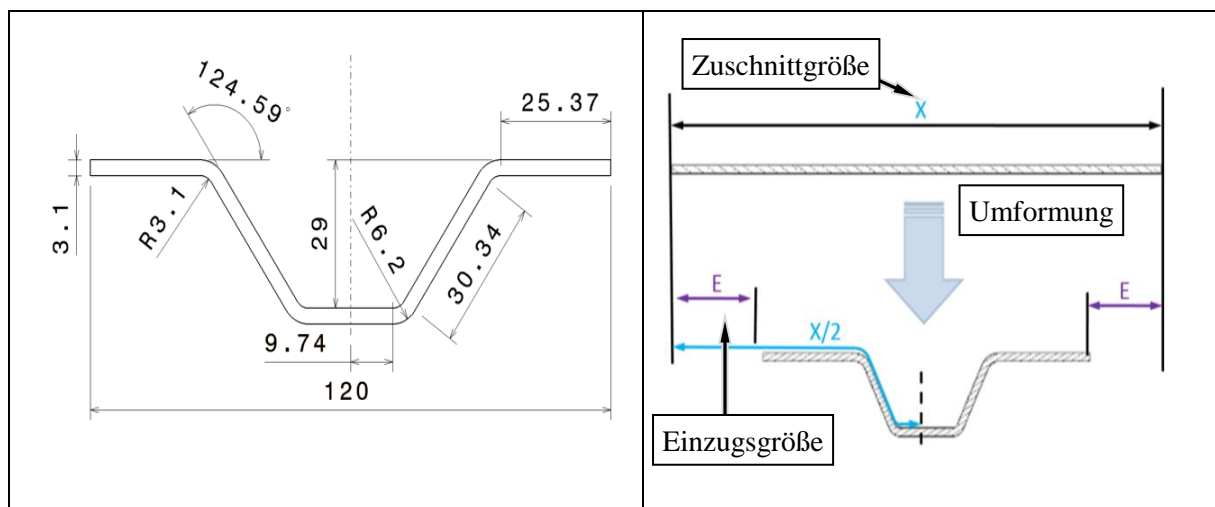


Abbildung 8.3-1: Abmaße der Demonstratorgeometrie für die bestromte Organoblechumformung

Die gewählte Geometrie impliziert eine Nachführung des erwärmten Halbzeuges während des Umformvorgangs. Zur Energie- und Zykluszeitreduktion soll das Halbzeug bis kurz vor dem Umformvorgang erwärmt und nach der Erstarrung wieder zeitnah aus der Presse entnommen werden. Eine durchgängige Fixierung des Organoblechs in einem Halterahmen ist daher zweckmäßig. Die sich ergebende Einzuggröße muss demzufolge bei der Konzeptionierung eines entsprechenden Endeffektors berücksichtigt werden. Der Versuchsstand wird dafür ausgelegt, Organobleche mit PA 66-, PPS- und PEEK-Matrizes sowie unterschiedliche Kohlenstofffaseraufbauten zykluszeitoptimiert und energieaufwandsreduziert aufzuheizen und umzuformen. Prämisse dabei ist, dass der gesamte Prozess voll automatisiert abläuft.



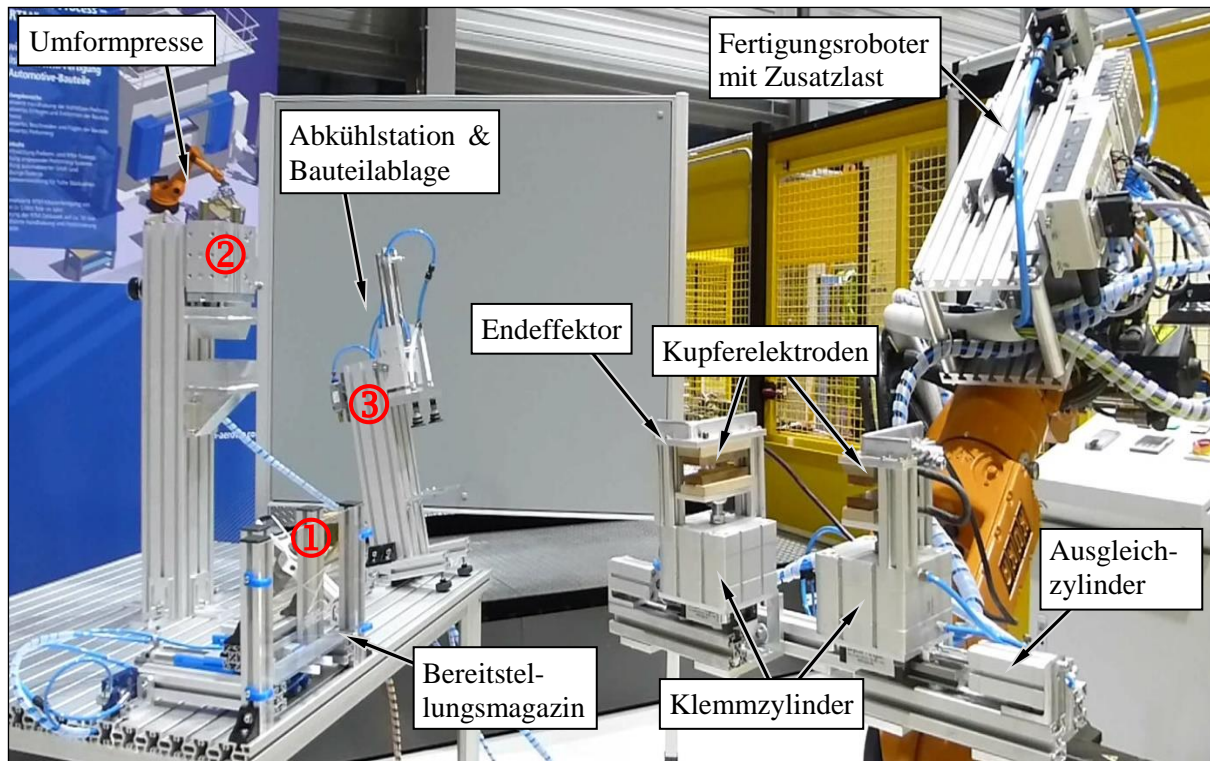


Abbildung 8.3-2: Entwickelter Versuchsstand zur Demonstrierung eines automatisierten Fertigungsprozesses zum Thermoformen von Organoblechen

Der angefertigte und in Abbildung 8.3-2 dargestellte Versuchsaufbau zur bestromten Thermoplast-Bauteilfertigung besteht im Wesentlichen aus drei Stationen (Bereitstellungsmagazin, Umformpresse, Bauteilablage), die mit einem Fertigungsroboter (KUKA KR 15) und einem applizierten Endeffektor nacheinander angefahren werden. Die Funktionen des Endeffektors entsprechen im Wesentlichen denen des Endeffektors für Trockenfasern. Lediglich die einstellbaren Klemmkräfte werden erhöht und deshalb größere Pneumatikaktuatoren installiert, um die geforderten Kräfte von  $1,4 \text{ N/mm}^2$  zur Reduktion des Übergangswiderstandes zu erreichen. Die Dämmeigenschaften werden entsprechend der höheren Prozesstemperaturen von bis zu  $500 \text{ °C}$  ebenfalls angepasst. Die maximal zur Direktbestromung handhabbare Probengeometrie beträgt in diesem Versuchsaufbau  $300 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ . Die Pneumatikaktuatoren und Vakuumsauger der drei Stationen (Bereitstellungsmagazin 1, Umformpresse 2 und Bauteilablage 3) sowie des Endeffektors sind mit einer Ventilinsel verbunden, die als Zusatzlast auf den Fertigungsroboter angebracht ist. Die automatisierte Ansteuerung aller notwendigen Funktionen erfolgt über das erstellte Roboterprogramm. Der Fertigungsroboter ist somit in dieser Prozessgestaltung der taktbestimmende Master.

Als ersten Prozessschritt entnimmt der Fertigungsroboter mithilfe des Endeffektors voll automatisiert ein aus dem Materialmagazin bereitgestelltes Organoblech, das pneumatisch aus einem Stapel von Zuschnitten geschoben wird (vgl. Abbildung 8.3-3 (links)). Dies Blech wird beidseitig ergriffen und die Stromeinleitung in das Halbzeug initiiert.

Durch die Nutzung der Transferzeit simultan zur Aufheizung der Thermoplastmatrix (vgl. Abbildung 8.3-3 (rechts)) wird Zykluszeit eingespart.

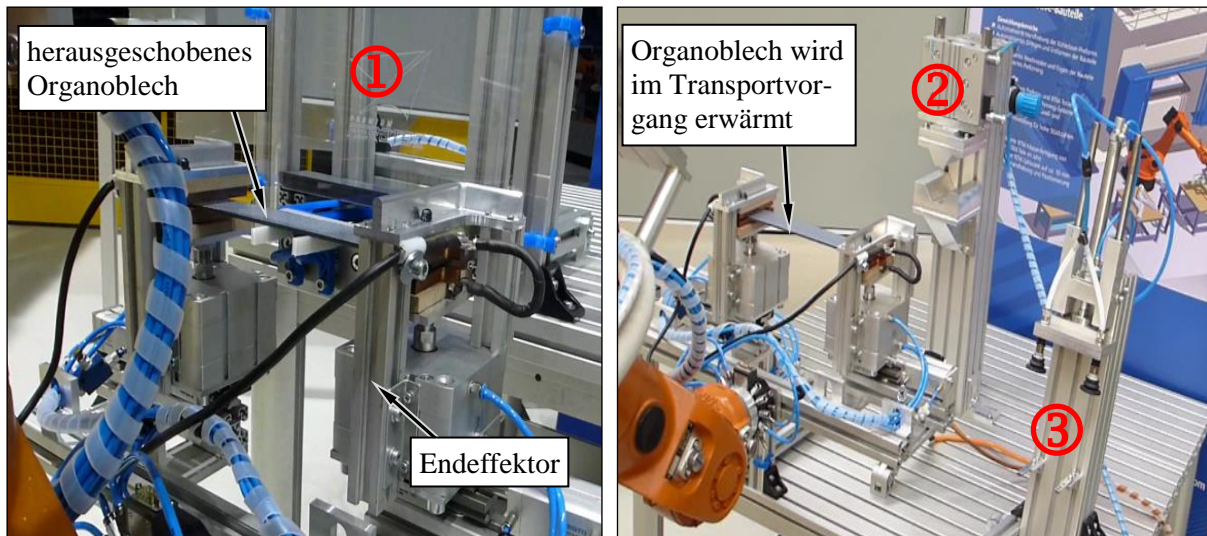


Abbildung 8.3-3: Entnahme eines der zugeschnittenen Halbzeuge aus dem Bereitstellungsmagazin (links) und Beginn des Bestromungsprozesses und Transport zur Umformpresse (rechts)

Wenn das Organoblech zwischen Ober- und Unterwerkzeug der Presse positioniert ist, muss diese nur solange geöffnet bleiben, bis die vorgesehene Umformtemperatur des Organoblechs erreicht ist (zu sehen in Abbildung 8.3-4 (links)). Dies kann über herkömmliche externe Sensoren oder mittels Auswertung der Widerstandsveränderung des gegriffenen Halbzeuges ermittelt werden (vgl. Kapitel 6.5 *Thermische Eigenschaften von Fasermatrix-Verbunden*). Der große Vorteil gegenüber herkömmlichen Verfahren ist, dass keine überhöhte Temperatur für das Halbzeug erzeugt werden muss, um Abkühlraten durch zusätzliche Transferbewegungen von einer Aufheizstation zur Umformstation zu kompensieren.

Ist die Umformtemperatur im Organoblech erreicht, wird die Stromzufuhr in das Halbzeug unterbrochen und das Formwerkzeug geschlossen. Durch die Umformung des 2D-Organoblechs zu einem 3D-Bauteil verkürzt sich dessen Länge. Die im Endeffektor integrierte Kinematik gleicht diesen Längenunterschied durch eine einstellbare Nachgiebigkeit aus. Dies wird bei dem hier entwickelten Endeffektor durch zwei seitlich angeordnete Pneumatikzylinder, wie in Abbildung 8.3-4 (rechts) zu sehen ist, realisiert.



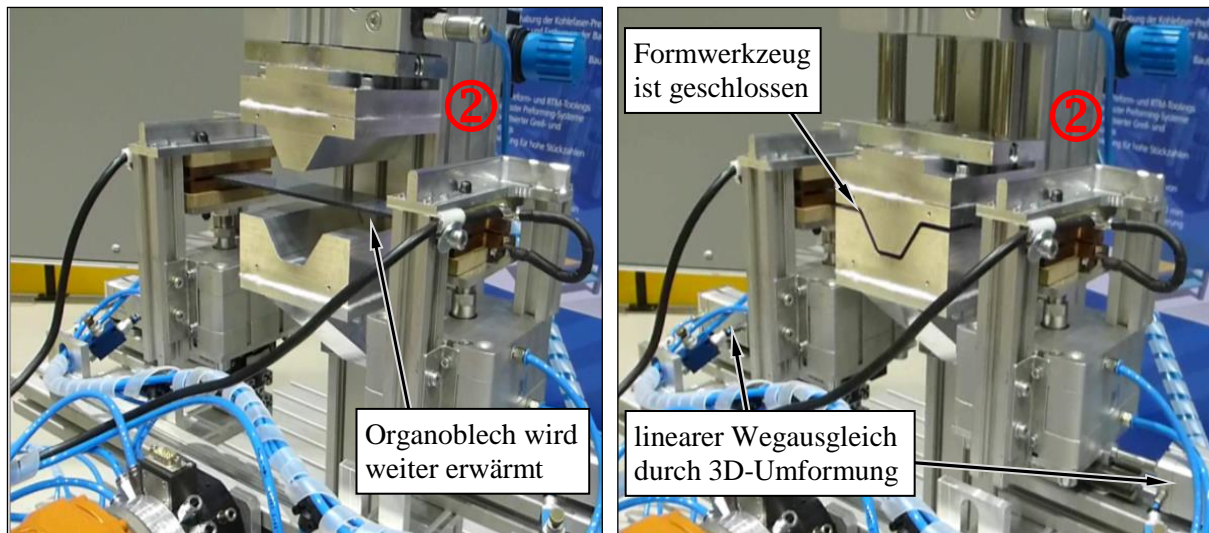


Abbildung 8.3-4: Umformwerkzeug bleibt bis Erreichen der Erweichungstemperatur geöffnet (links) und Endeffektor gleicht Längenänderung durch Verformung des Halbzeuges aus (rechts)

Da das Organoblech während der gesamten Prozesskette in einer Aufspannung fixiert wird, ist die Position stets bekannt und das umgeformte Halbzeug kann direkt nach Öffnen des Umformwerkzeuges entnommen und abtransportiert werden (Abbildung 8.3-5 (links)), ohne einen zusätzlichen Positionserkennungs- und Greifprozess. Zur Zykluszeit- und Pressenbelegungszeitreduktion wird das Organoblech nur soweit nach der Umformung zum Bauteil in dem Umformwerkzeug abgekühlt, dass die neue Form erhalten bleibt. Das noch ca. 200 °C heiße Bauteil wird an die Ablegestation übergeben, indem zwei Hochtemperaturvakuum-sauger (HT-Sauger) es vom Endeffektor ansaugen und somit übernehmen (vgl. Abbildung 8.3-5 (rechts)). Die Kontaktklemmen am Endeffektor werden geöffnet und der Roboter kann die Station ohne das Bauteil verlassen.

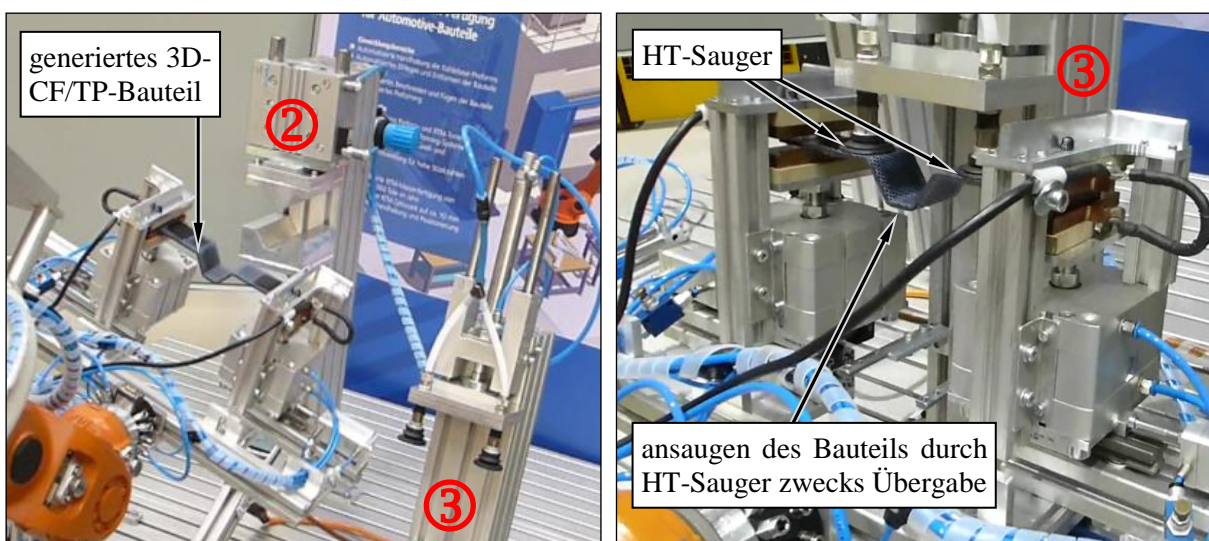


Abbildung 8.3-5: Transport des geformten Omega-Bauteils zur Ablage (links) und Übergabe des generierten Bauteils an die Ablagestation (rechts)

Der Prozess kann jetzt mit dem nächsten bereitgestellten Organoblech aus dem Zugschnittmagazin fortgesetzt werden, während das erzeugte warme Bauteil nach einer definierten Abkühlzeit hauptzeitparallel abgestapelt wird.

## 8.4 Energieverbrauch einer optimierten Organoblecherwärmung

Die Aufheizversuche an Organoblechen mit unterschiedlichen Stromstärken haben verschiedene Aufheizraten ergeben (vgl. Abbildung 8.1-4). PPS-Organobleche werden im Folgenden direkt bestromt, um den Zusammenhang zwischen einer variierend eingeleiteten Stromstärke zum theoretischen und realen Energieaufwand zu ermitteln.

Die verwendeten Thermoplastprobenkörper bestehen aus 14 Lagen (TORAYCA: T300J B – 3000 – 40 B) mit PPS-Matrix (FORTRON 0214) und werden in dem bereits beschriebenen Endeffektor von Raumtemperatur auf 200 °C aufgeheizt. Die Bestromungstrecke beträgt dabei 200 mm. Zunächst wird der theoretische Wert für die dazu benötigte Leistung bestimmt. Hierzu werden die spezifischen Wärmekapazitäten der Proben benötigt. Diese betragen laut der entsprechenden Datenblätter für die PPS-Matrix 1830 J/kgK [36] und für die Kohlenstofffasern 710 J/kgK [12]. Mit einem Faservolumenanteil von 50 % der Proben ergibt sich mit den entsprechenden Dichten aus den Datenblättern (Matrix 1.350 kg/m<sup>3</sup>, Kohlenstofffaser 1.800 kg/m<sup>3</sup>) mit der nachstehenden Gleichung (8-1) für den Fasermassenanteil  $\psi$  ein Gewichtsanteil der Matrix von 43 %.

$$\psi = \frac{\rho_{Faser} \cdot \varphi}{\rho_{Matrix} + ((\rho_{Faser} - \rho_{Matrix}) \cdot \varphi)} \quad (8-1)$$

Die Proben haben ein Gewicht von 104 g, woraus sich ein Gewicht der Matrix von 44,72 g errechnen lässt. Bei der Direktbestromung wird jedoch – bedingt durch die Kontaktklemmen – primär der zwischen Plus- und Minuspol liegende Bereich erwärmt (vgl. Kapitel 8.1 *Einflussermittlung von Matrixwerkstoffen*) und der außerhalb der Bestromung liegende Abschnitt lediglich über die Wärmeleitung. Aus diesem Grund wird für die theoretische Ermittlung nur dieser Bereich, wie auch in Abbildung 8.4-1 zu sehen ist, betrachtet, da für sehr kurze Wärmeentwicklungszeiten (< 1 min) die Verluste im Außenbereich zu vernachlässigen sind.

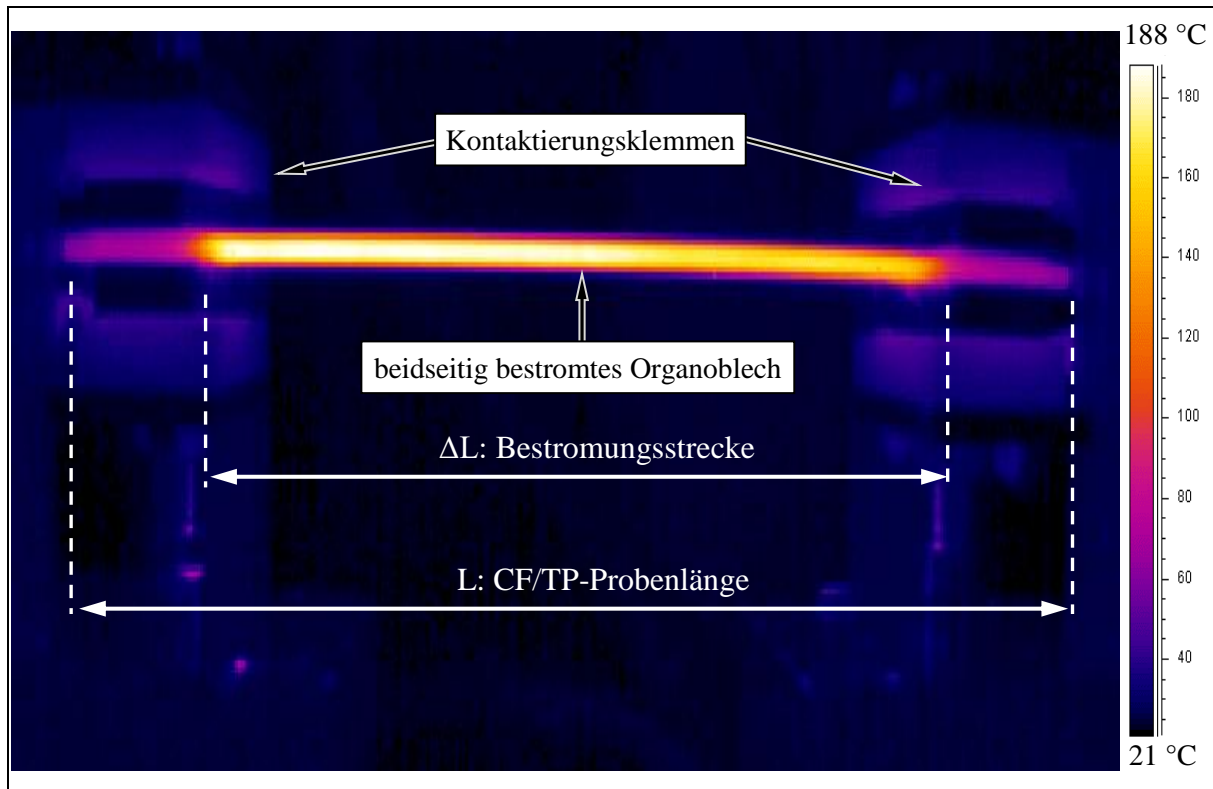


Abbildung 8.4-1: Bestromtes Kohlenstofffasergewebehalbzeug mit PPS-Matrix

Durch die Bestromungsstrecke  $\Delta L$  ergibt sich ein Anteil des Fasergewichtes von 42,19 g sowie eine Masse der Matrix von 31,82 g. Mit der folgenden vereinfachten Formel lässt sich die theoretische Leistung je benötigte Zeit berechnen:

$$P_{theo} = \frac{(m_{Faser} \cdot c_{Faser} + m_{Matrix} \cdot c_{Matrix}) \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (8-2)$$

Aus den praktischen Versuchen werden die real benötigten Leistungsmengen ermittelt, welche die Verluste durch Wärmekonvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung beinhalten. Die aus den Bestromungsversuchen ermittelten Werte sind zusammen mit den berechneten, theoretisch notwendigen Leistungswerten in einer Grafik in Abbildung 8.4-2 aufgetragen. Es ist erkennbar, dass mit gesteigertem Energieeintrag der Anteil an der Verlustleistung sinkt. Dies hängt mit der kürzeren Zeitdauer der Erwärmung zusammen, bis die für diese Versuchsreihe definierte Zieltemperatur von 200 °C erreicht ist. Durch die kurze Aufheizzeit kann dementsprechend auch weniger Wärme an die Umgebung abgegeben werden und die Eindringtiefe des Elektronenflusses in das Halbzeug vergrößert sich zudem mit der erhöhten Strommenge (vgl. Kapitel 6.4 *Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern*).

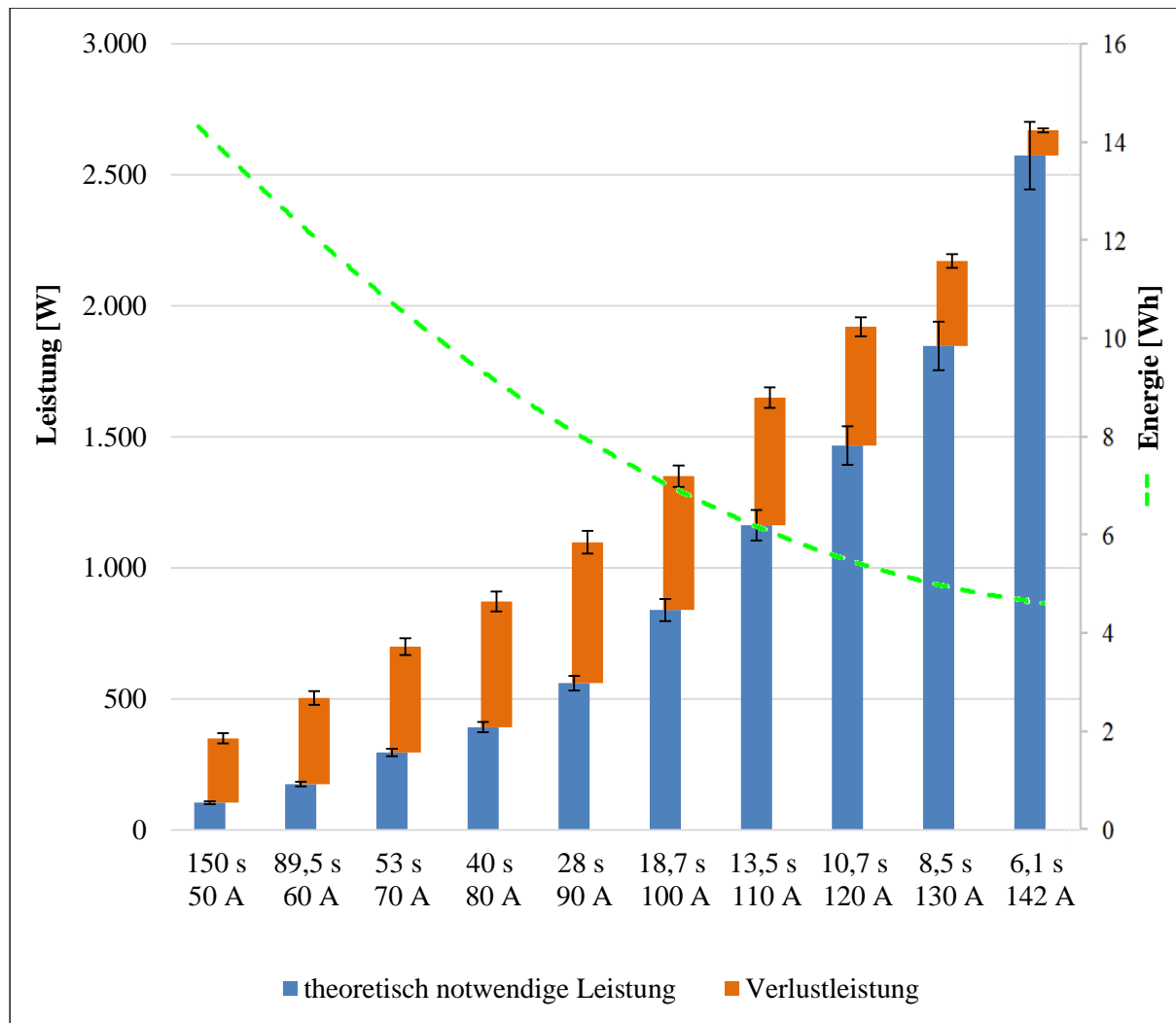


Abbildung 8.4-2: Zusammenhang von Stromstärke, Verlustleistung und Energieverbrauch

Die in das Organoblech eingeleitete Leistung erhöht sich mit gesteigerter Stromstärke. Bezogen auf die Einwirkzeit ergibt sich jedoch mit gesteigerter Stromzufuhr, neben einer verkürzten Zykluszeit, ein reduzierter Energieverbrauch je aufgeheiztes Bauteil. Als Grundsatz kann demzufolge festgehalten werden: Je höher die eingeleitete Leistung in Form von Stromstärke für die Erwärmung in das Halbzeug ist, desto mehr Energie wird im Erwärmungsprozess eingespart. Wird die PPS-Probe CFPS674, die mit 142 A bestromt wurde, mit einer Aufheizung im IR-Ofen verglichen, so ergeben sich die in Abbildung 8.4-3 (links) gegeneinander aufgetragenen Leistungen. Aufgeführt sind der theoretisch optimale Abstand der IR-Strahler zum Halbzeug von 50 mm sowie der – aufgrund der Höhe des Halterahmens und des benötigten Freiraums für die Kinematik – real notwendige Abstand von 200 mm. Deutlich ist zu erkennen, dass mit der direkten Stromeinleitung im Gegensatz zur Infrarotaufheizung in das Organoblech wesentlich mehr Leistung in kürzerer Zeit übertragen werden kann. Diese notwendigen Leistungen können nach der Einwirkzeit normiert werden und es ergibt sich der jeweilige Energieverbrauch, wie in Abbildung 8.4-3 (rechts) zu sehen ist.

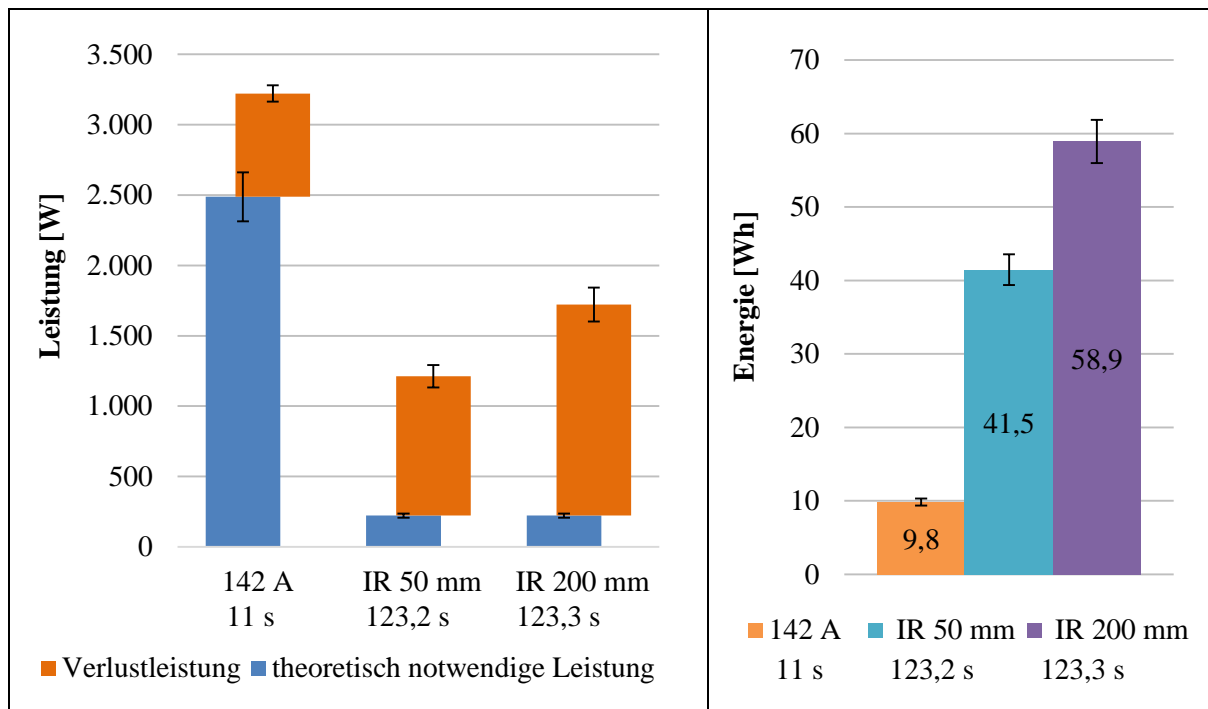


Abbildung 8.4-3: Aufteilung der benötigten Leistungen von Direktbestromung und IR-Heizfeld (links) und Darstellung der notwendigen Energie je Bauteil bis Umformtemperatur erreicht ist (rechts)

Die eingesparte Energie durch Direktbestromung je Bauteil liegt hier gegenüber dem theoretisch optimalen Wert für IR-Heizfelder bei 76 % und als Vergleich zum realen Energieverbrauchswert der IR-Heizung bei 83 %. Somit werden nur noch 17 % vom herkömmlichen Energievolumen zur Organoblecherwärmung benötigt. Bei einer Erwärmung mittels einer Direktbestromung wird der Heizvorgang unmittelbar nach dem Ergreifen des Halbzeuges gestartet und kurz vor dem Umformvorgang wieder gestoppt. IR-Heizfelder benötigen für eine optimale Leistung eine Vorwärmphase und werden für kurze Zeitintervalle nicht abgeschaltet (vgl. Kapitel 7.5 *Energieverbrauch des optimierten Preformingprozesses*). Demzufolge wird bei der IR-Heizvariante im realen Fertigungsprozess noch wesentlich mehr Energie verbraucht, die in dieser Darstellung jedoch nicht aufgeführt ist. Die Energieersparnis der Direktbestromung ist demnach sogar noch höher als hier dargestellt.

In den vorangegangenen Versuchen wurde gezeigt, dass Organobleche rasch und energieeffizient mittels der Direktbestromung aufgeheizt werden können. Als Vergleichsbeispiel zum derzeit üblichen IR-Aufheizprozess werden ein bestromtes PPS-Organoblech sowie ein PEEK-Faserhalbzeug mit der im Versuchsaufbau maximalen Stromeinleitung von 142 A bestromt und in die Omegademonstratorform umgeformt. Die PPS-Versuchssprobe CFPS674 (Details vgl. Anhang 13.4) besteht aus 14 Lagen, hat eine Größe von 292 mm x 43 mm x 4,4 mm, ein Gewicht von 85 g und eine Ausgangstemperatur von 22 °C. Durch die doppelseitige Stromeinleitung ist die angestrebte Umformtemperatur von 332,4 °C bereits nach 11 s erreicht und der Umformprozess kann initiiert werden. Als PEEK-Versuchssprobe wird CFPE668 (Details vgl. Anhang 13.4)

mit ebenfalls 14 Gewebelagen, eine Größe von 274 mm x 52,7 mm x 4,49 mm sowie ein Gewicht von 99 g herangezogen. Mit dem Bestromungskonzept dauert dessen Erwärmung von 22 °C auf 426,2 °C gerade mal 37 s bei einer Stromstärke von ebenfalls 142 A. Es werden die gleichen Proben bei Raumtemperatur mittels doppelseitig angeordneter IR-Heizfelder aufgeheizt, um einen Vergleich zum herkömmlichen Umformverfahren ziehen zu können. Dieser Prozess benötigt für die PPS-Probe eine Aufheizzeit von 123,2 s um 330 °C zu erzielen; für die PEEK-Probe eine Zeit von 161,2 s, um die erforderlichen 425 °C zu erreichen. Außerdem unterscheiden sich der bereits etablierte, automatisierte Umformprozess für Organoblech mittels IR-Heizfelder einerseits und der neu entwickelte automatisierte Fertigungsprozess andererseits in folgenden Hauptschritten:

IR-Heizfeld	Direktbestromung
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergreifen CF/TP bei RT</li> <li>2. Transfer 1: CF/TP in IR-Ofen</li> <li>3. Aufheizen CF/TP auf Umformtemperatur</li> <li>4. Überheizen CF/TP um Abkühlung durch Transfer zur Presse auszugleichen</li> <li>5. Transfer 2: erwärmtes CF/TP zur Umformstation</li> <li>6. Umformung 2D-CF/TP in 3D-Bauteil</li> <li>7. Transfer 3: Entnahme 3D-Bauteil</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ergreifen CF/TP bei RT</li> <li>2. Transfer 1: zur Umformstation und zeitgleich Erwärmen CF/TP</li> <li>6. Umformung 2D-CF/TP in 3D-Bauteil</li> <li>7. Transfer 3: Entnahme 3D-Bauteil</li> </ol>

Tabelle 8.4-1: Prozessschritte zur Erwärmung und Umformung von Organoblechen basierend auf herkömmlicher IR-Erwärmung versus Direktbestromung

Die Integration des Aufheizprozesses in die Transportvorrichtung sowie die Nachgiebigkeit dieser in Bezug auf den Umformprozess, erspart Aufheiz- und Transportzeiten. Da bereits während des Transportes des Halbzeuges mit der Erwärmung begonnen wird, reduziert sich die Anzahl an nicht wertschöpfenden Transportzeiten im Prozessablauf mit diesem Direktbestromungsansatz. Bei einem separaten IR-Heizfeld werden die Organobleche höher als die benötigte Umformtemperatur erwärmt, um Abkühlraten durch den zusätzlichen Transfer vom Ofen zur Umformstation vorzubeugen. Durch die Direktbestromung muss das Organoblech nur auf Umformtemperatur erwärmt werden, da das Halbzeug direkt in der Presse bis unmittelbar vor der Umformung erwärmt werden kann. Transportwege von der Erwärmungsstation zur Umformstation sind hier nicht notwendig. Dies erfolgt durch die Stromeinleitung in das Faserhalbzeug zudem effizienter



als beim IR-Heizprozess. Die Gesamtzykluszeit sowie die einzelnen Teilzeiten je Prozessschritt sind in der folgenden Abbildung 8.4-4 dargestellt.

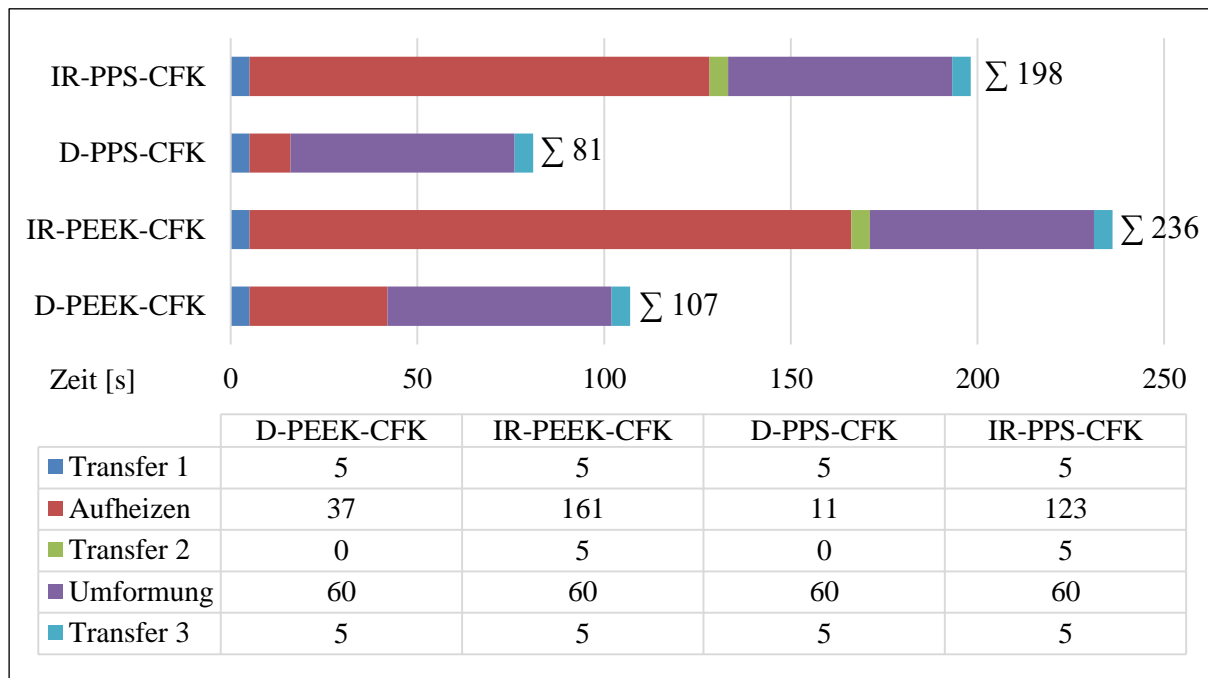


Abbildung 8.4-4: Zykluszeiten zur Erwärmung und Umformung von CF/TP mittels IR versus Direktbestromung (D)

Es ergibt sich demnach beim IR-Prozess eine mögliche Zykluszeit von 198 s für PPS-Halbzeuge und 236 s für PEEK-Halbzeuge. Die benötigte Zykluszeit für einen Direktbestromungsprozess liegt bei PPS-Halbzeugen bei 81 s und bei PEEK-Halbzeugen bei 107 s. Eine Fertigungsstraße, die mittels direkter Stromeinleitung in das Halbzeug dessen Erwärmung erzeugt, benötigt also für PPS-Halbzeuge nur noch 41 % der herkömmlichen Zykluszeit und für PEEK-Halbzeuge lediglich noch 45 % der Zeit. Die Direktbestromungsvariante ist folglich mehr als doppelt so schnell wie eine vergleichbare Fertigungsstraße, die auf IR-Heizfeldern basiert.

Bei dieser Gegenüberstellung ist jedoch zu beachten, dass derzeit eine maximale Aufheizrampe von 150 °C/min für das Material aufdiktiert wird, um eine entsprechende Qualität der Matrix zu gewährleisten. Dies hängt mit der Wirkweise der IR-Aufheizung zusammen, da das Organoblech hierbei von außen erwärmt und diese Energie dann durch Wärmeleitung ins Innere geführt werden muss (vgl. Kapitel 5.1 *Energieflussbetrachtung*). Eine Verkürzung der Aufheizzeit kann nur mit höher eingestellter Leistung der IR-Strahler und den damit resultierenden erhöhten Temperaturen an den Oberflächen des Halbzeuges erreicht werden, was zu Performanceeinbußen bzw. Schädigung der Thermoplastmatrix führt. Weil die Erwärmung bei der Direktbestromung von innen heraus geschieht, erfolgt die Erwärmung im Querschnitt des Organoblechs homogener und es entstehen somit niedrigere Temperaturspitzen. Ein Überheizen zur Kompensation von Abkühlraten durch einen zusätzlichen Transfer vom Ofen zur



Umformstation ist aufgrund der Kinematik und Funktionsweise der Direktbestromung des Endeffektors zudem nicht notwendig.

## 9 Effektive Erwärmung im RTM-Prozess

Bei herkömmlichen Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils durch eine thermische Aushärtung wird der im Injektionswerkzeug platzierte Preform durch die betreffenden anliegenden Werkzeugteile (z. B. ein Werkzeugoberteil und ein Werkzeugunterteil) beheizt. Da die Innenflächen der herkömmlich verwendeten Formschalenhälften in Endbauteildicke starr zueinander positioniert sind, wird der Faserpreform nur entsprechend des eingestellten Faservolumengehaltes eingeeengt. Dadurch erfolgt dessen Wärmeübertragung eher mäßig von den heißen Formhälften auf die Oberflächen des eingelegten, schwach kompaktierten Faserhalbzeuges und muss von dort nach innen transportiert werden. Vorversuche zur Stromeinleitung zwecks Temperaturerhöhung mit aufgespreizten und somit unkomprimierten Kohlenstofffasern haben demgegenüber gezeigt, dass kurze Aufheizraten möglich sind (vgl. Kapitel 6.4 *Elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern*). Aus diesem Grund soll das thematisierte Bestromungskonzept für duroplastische RTM-Bauteile erweitert werden, um diesen Prozess bzgl. Zykluszeit und Energieverbrauch zu optimieren. Zur Verdeutlichung wurde ein speziell für den RTM-Prozess entwickeltes Werkzeugkonzept entworfen, konstruiert und gefertigt, mit dem Ziel, eine Direktbestromung der innen liegenden Kohlenstofffasern zu ermöglichen.

### 9.1 Injektionsformschalen zur Stromeinleitung in den Preform

Das für den RTM-Prozess selbst entwickelte Konzept sieht vor, elektrisch isolierte, thermisch gedämmte und zudem flexible Injektionsformschalen zu verwenden. Zu diesem Zweck sind an der Innenseite der Formschalen mehrere elektrische Kontakte angeordnet, um über diese einen Stromfluss zum Widerstandsheizen der im Werkzeug angeordneten Kohlefaserpreform zu ermöglichen. Der selbst konzipierte Aufbau ist anschaulich mit den wesentlichen Komponenten als Schnittdarstellung in Abbildung 8.3-1 zu sehen.

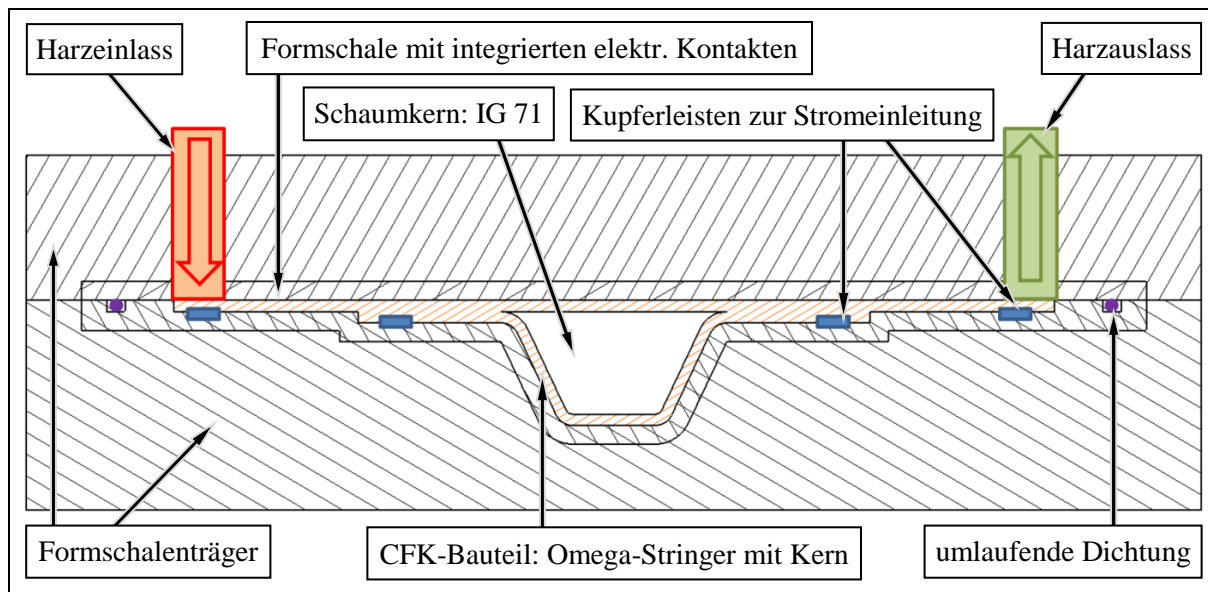


Abbildung 9.1-1: Schnittdarstellung von einem selbst entwickelten RTM-Werkzeugkonzept basierend auf einer Injektionsformschale zur Erwärmung des CF-Preforms mittels einer Direktbestromung

Die Formschale übernimmt primär die Aufgabe der elektrischen Isolation der Kohlenstofffasern zu dem umgebenden steifen, metallischen Presskörper, damit der Bestromungsprozess der CF-Preforms ungestört durchgeführt werden kann. Die Aufnahme der Formschalen ist in einer Presse oder Zuhaltevorrichtung integriert und nimmt die durch die Harzinjektion auftretenden Drücke auf. Damit die Formgebungsqualität der Formschalen den angestrebten Qualitätsansprüchen genügt, sollte diese entweder sehr steif oder – wenn diese aus einem elastischen Material gefertigt ist – sehr dünn ausgeführt werden. Flexible Formschalen mit niedrigen Querschnitten haben den Vorteil, dass diese die Entformung des gefertigten Bauteils erleichtern können. Da die Harzinjektion nur innerhalb der abgedichteten Injektionsschalen geschieht, können diese nach dem Aushärtvorgang problemlos aus der Pressenaufnahme entnommen werden. Durch leichtes Tordieren dieser Formschalen kann das gefertigte, starre CFK-Bauteil problemlos aus ihnen entformt werden.

Als Demonstratorgeometrie wird die auf einem Hautfeldabschnitt applizierte Omegastruktur gewählt, die bereits aus Kapitel 7.3 bekannt ist. Für die nachfolgend beschriebenen Versuchsaufbauten werden die flexiblen Formschalen mit integrierten Stromeinleitungspunkten aus glasfaserverstärktem Material mit einer minimalen Dicke von 3 mm gefertigt. Das Bestromungskonzept lehnt sich an das in Kapitel 7.3 ermittelte Optimum an und ist schematisch in Abbildung 9.1-2 (links) mit einem Foto vom definierten Demonstratorpreform mit innen liegenden Schaumkern dargestellt. Die Stromeinleitungssteuerung wird mit dem abgestimmten Erwärmungsprogramm von K1–K4 0,5 s, K2–K3 0,5 s, K1–K3 0,1 s, K2–K4 0,6 s programmiert. Auf den gefertigten GFK-Formschalen sind zehn Thermoelemente appliziert, um die Erwärmung der Kohlenstofffasern im geschlossenen Zustand detektieren zu können (vgl. Abbildung 9.1-2 (rechts)).

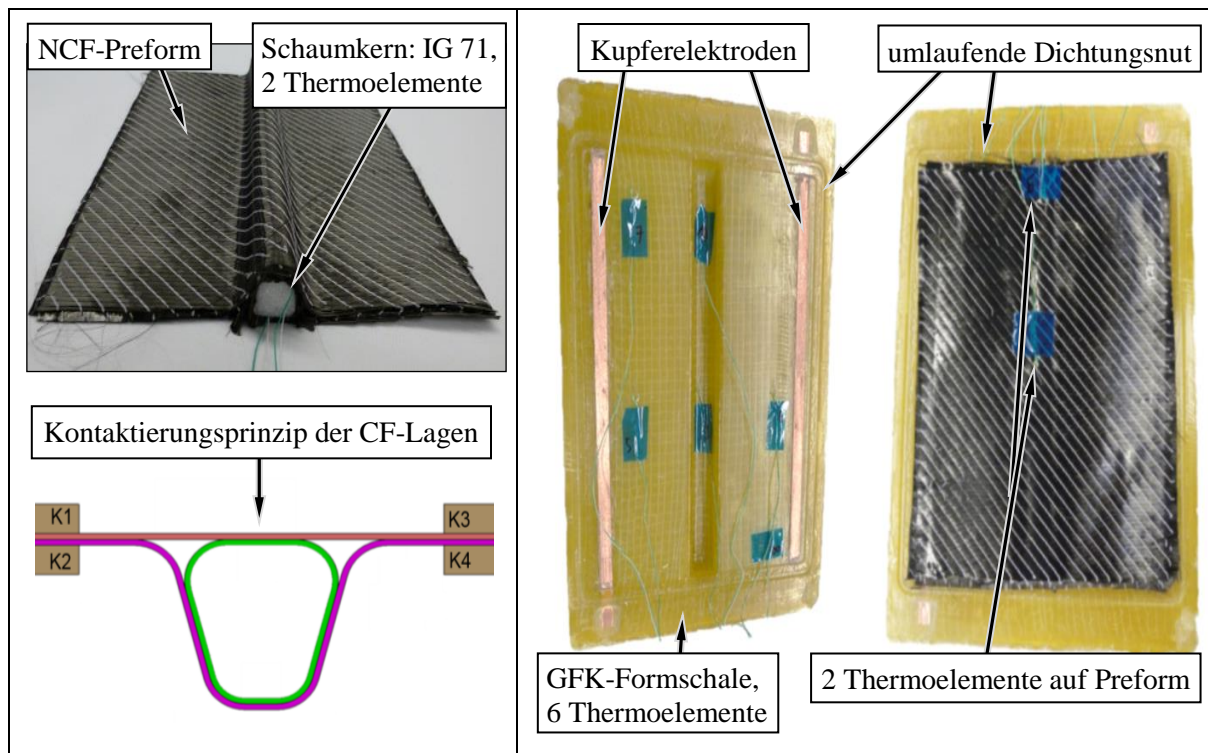


Abbildung 9.1-2: Demonstratorpreform sowie Bestromungskonzept (links) und untere GFK-Formschale mit integrierten Kupferleisten und applizierten Thermoelementen (rechts)

Die vier in den GFK-Formschalen integrierten Kupferelektroden kontaktieren den Preform beidseitig über die komplette Länge und haben selbst eine Breite von 10 mm. Sie sind mit minimalster Breite gefertigt, da sie merkliche, zumeist unerwünschte Spuren auf dem fertigen Bauteil hinterlassen. Die beidseitig doppelseitig applizierten Kupferelektroden werden mittels definierter Überpressung an die Fasern gedrückt, um den elektrischen Übergangswiderstand in den Preform gering zu halten. In den vorangegangenen Versuchen hat sich diesbezüglich ein konstruktiver Überpressungsfaktor von 10 % auf den um den Harzfaktor reduzierten Abstand des eingestellten Faservolumen-gehaltes als optimal herausgestellt. Durch die Überpressung an diesen Kontaktstreifen wird der Preform gleichzeitig in seiner Lage gegenüber eines möglichen Verrutschens – infolge einer asymmetrisch oder diesbezüglich ungünstig auftretenden Harzfront – gesichert. Für den Versuch sollen die GFK-Formschalen außerhalb der Werkzeugaufnahme geschlossen und bestromt werden, um die äußere Wärmeentwicklung der Schalen mittels Wärmebildkamera zu erfassen. Dazu werden die Formschalen mit Schraubzwingen und Kniehebelspannern aneinander gepresst; so wird der Kontaktierungsdruck, wie er im RTM-Werkzeug sein wird, aufgebracht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 9.1-3 zu sehen.

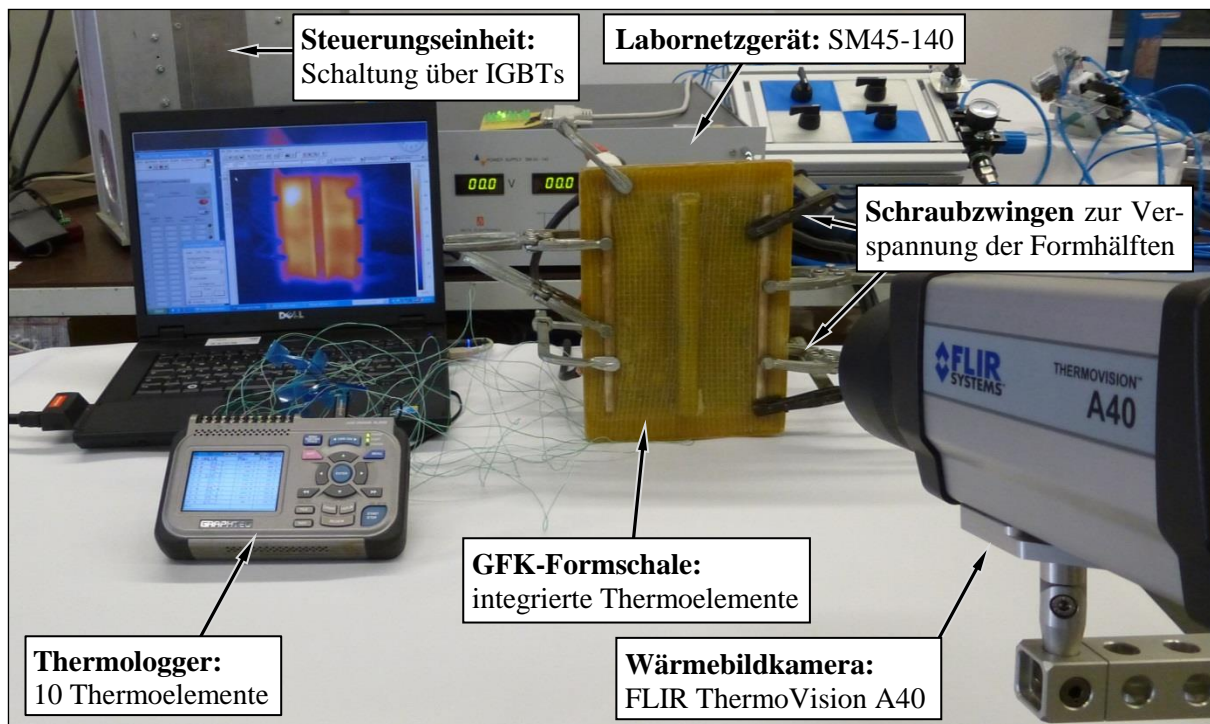


Abbildung 9.1-3: Versuchsaufbau zur Bestromung von CF-Preforms innerhalb von Injektionsformschalen

Die Aufheizung des eingelegten Preforms erfolgt mit 120 A homogen, wie die vorangegangenen Vorversuche bzgl. Bestromung von CFs bereits gezeigt haben. Die Erwärmung der Formschalen nach außen liegt nach 17 s bei ca. +6 K, während die Kohlenstofffasern, die bei Raumtemperatur eingelegt wurden, bereits eine Temperatur von ca. 183 °C erreicht haben. Dadurch wird deutlich, dass sich das wahre Potenzial erst in der Kombination aus Formschale und Direktbestromung von Kohlenstofffasern mit der Umstellung des üblichen isothermen RTM-Verfahrens auf eine variotherme Prozessführung offenbart. Dies soll im Folgenden detailliert betrachtet werden.

## 9.2 Variotherme Prozessführung

Für einen Injektionsprozess von Faserhalbzeugen ist die Qualität der Faserbenetzung für die Performance des erzeugten Bauteils von entscheidender Bedeutung. Fehlstellen in der Faser-Matrix-Grenzfläche sowie entstandene Porositäten in der Matrix verschlechtern die Krafteinleitung in die Verstärkungsfasern und die Kraftumleitung bei Faserfehlstellen. Zudem können Hohlräume Risse induzieren, die sich zwischen Faser und Matrix im Gefüge ausbreiten können. Aus diesem Grund findet die Harzinjektion im Vergleich zu der optimalen Aushärtetemperatur bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen statt, um die Viskosität des Harzes möglichst niedrig zu halten. Damit die Injektionszeit bei isothermen Prozessen nicht zu weit ausgedehnt wird, muss deshalb ein Kompromiss

zwischen optimaler Injektionstemperatur und kürzester Aushärtezeit gefunden werden. Durch ein optimiertes, meist mehrkomponentiges Harzsystem kann die Reaktionszeit eingestellt werden; jedoch ist auch hier immer noch die vorherrschende Temperatur bzw. ein möglicher Temperaturunterschied eine entscheidende Einflussgröße. Aus diesem Grund wird die bei der Vermischung von Harz und Härter auftretende exotherme Reaktion durch ein kurzzeitiges Überspringen der Werkzeuginnentemperatur bereits bewusst für eine beschleunigte Vernetzungsgeschwindigkeit genutzt. Der derzeitige, zykluszeitgetrimmte isotherme HD-RTM-Prozess zur Herstellung von CFK-Serienbauteilen erlaubt nur sehr kurze Injektionszeitfenster, in denen das Harz-Härtergemisch sich gerade noch adäquat injizieren und im Preform verteilen lässt. Das schneller gelierende Harzgemisch führt zu einem primären Makrofluss des Harzes, also dem Umspülen der Rovings des Halbzeuges. Der für die Stabilität des Bauteils wichtige Mikrofluss, also die Infiltration der Rovings, wird mit steigendem Gelierungsgrad zunehmend behindert.

Die Lösung zur Erzeugung einer optimalen Injektions- und Aushärtetemperatur ist eine variotherme Prozessführung (vgl. Kapitel 2.3.3.3 *Isotherme im Vergleich zur variothermen Prozessführung*). Ein Nachteil besteht bei der Überführung der Theorie in die Praxis jedoch darin, dass Serienwerkzeuge wegen den hohen Drücken und Stückzahlen meist in Metall und sehr massiv ausgeführt und somit gegenüber raschen Temperaturniveauänderungen träge sind. Sowohl beim Aufheizen als auch beim Abkühlen sind diese mit den derzeitigen Fertigungskonzepten schwer zu erreichen, sofern nicht extrem hohe Heiz- bzw. Kühlleistungen aufgewendet werden. Durch die Bestromung der Verstärkungsfasern in einer gedämmten Formschale erfolgt ihre Beheizung wesentlich energieeffizienter als nach dem derzeitigen Stand der Technik und ermöglicht dadurch eine variotherme Prozessgestaltung zur Erstellung von kohlenstoffaserverstärkten Bauteilen.

Die Abbildung 9.2-1 zeigt die charakteristischen Kurvenverläufe für Mehrkomponenten-Harzsysteme für konventionelle isotherme Prozessführungen bei unterschiedlichen Temperaturen und als Vergleich den Verlauf einer variothermen Prozessgestaltung. Mit dem vorgestellten Bestromungskonzept für Injektionsformschalen ist ein Temperaturzyklus realisierbar, der beispielhaft vorsieht, dass der eingelegte Preform bei einer Starttemperatur (z. B. Raumtemperatur) zunächst rasch auf eine für die Injektion optimale Temperatur  $T_1$  erwärmt wird. Die Temperatur  $T_1$  wird dann eine vordefinierte Zeit lang gehalten, während die Injektion des Harzmaterials in die Preform bei optimaler Viskosität erfolgt. Nach Abschluss dieser Injektion wird die Temperatur nochmals rasch von  $T_1$  durch die Direktbestromung auf eine Aushärtetemperatur  $T_2$  erhöht und eine definierte Zeit lang gehalten, um die infiltrierte Preform zum Faserverbundbauteil auszuhärten. Nach diesem Aushärtevorgang wird die Temperatur  $T_2$  durch Abschaltung der Bestromung und Entnahme der Formschale wieder rasch abgekühlt. Der gesamte Temperaturzyklus benötigt eine Zeitdauer, die um ein Vielfaches im direkten Vergleich zu



einem isothermen Prozess verkürzt ist.

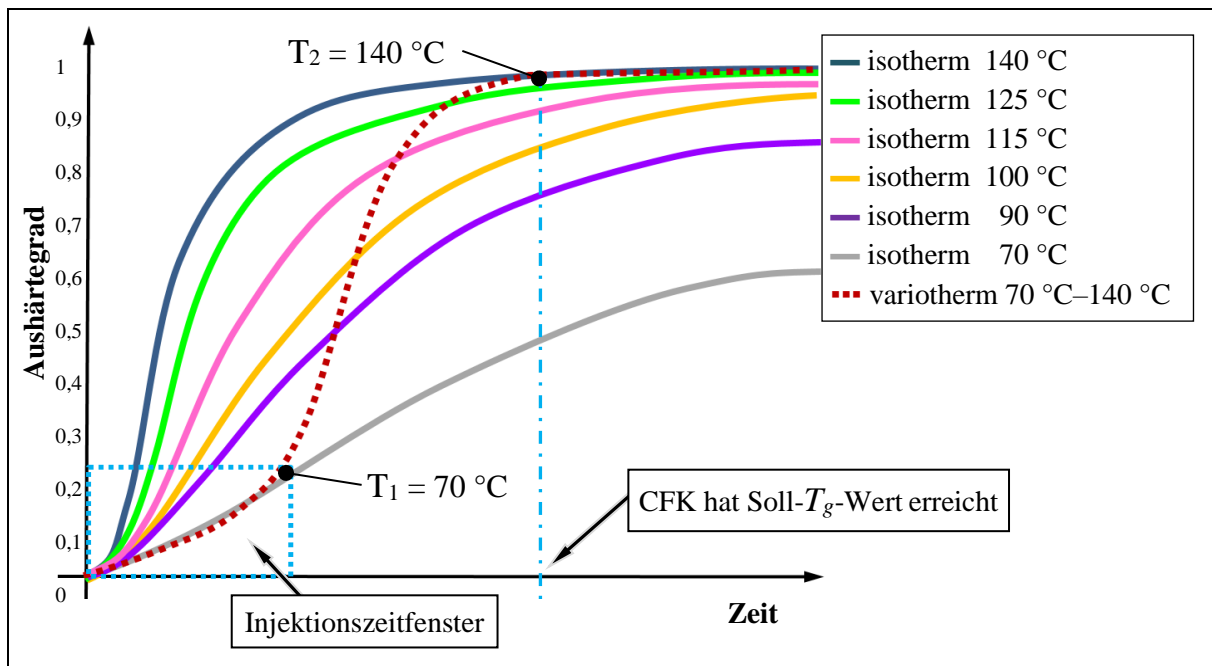


Abbildung 9.2-1: Vergleich von isothermen zu variothermen Aushärtezyklen von CFK-Bauteilen

Neben der verbesserten Zykluszeit wird auch der Energieverbrauch gesenkt, da nur der benötigte Preform aufgeheizt werden muss. Durch die Dämmeigenschaften der Injektionsformschalen reduzieren diese zugleich die thermische Trägheit des RTM-Prozesses, wodurch steile Temperaturverlaufsrampen und damit kurze Zykluszeiten ökonomisch erzielbar sind.

### 9.3 Harzflussbeeinflussung durch angepasste Bestromungsmuster

Für sehr große, komplexe und asymmetrische CFK-Bauteile ist neben der notwendigen Injektionszeit auch ein definierter Harzfluss für die Qualität des erstellten Produktes von entscheidender Bedeutung. Es kann zu Qualitätseinbußen kommen, wenn während der Injektion unkontrolliert voreilende Harzfronten entstehen, die durch Einkreisung oder Blockaden infolge eines örtlich verfrühten Gelierens der Matrix Lufteinschlüsse herbeiführen. Heutzutage ist es üblich, Fließkanäle, Steiger, Überlaufkavitäten oder Fließhilfen im Werkzeug oder auf dem Preform zu integrieren, um den Harzfluss steuern zu können. Für eine Begrenzung oder Umleitung des Harzflusses werden sogenannte Fließstopper eingebracht, die mittels lokalen Überpressungen den Harzfluss abbremsen, stoppen oder umlenken. Diese Hilfsmaßnahmen haben aber den Nachteil, dass sie zu einem erhöhten Nacharbeitsaufwand – zum Beispiel durch Entfernung von Harzkanälen auf

dem gefertigten Bauteil – führen oder die Festigkeitseigenschaften durch einen lokal geänderten Faservolumenanteil negativ beeinflussen.

Bei der Direktbestromung fungiert der Kohlenstofffaserpreform selbst als Widerstandsheizung und kann durch die bereits vorgestellte Steuerung gezielt homogen oder definiert partiell erwärmt werden (vgl. Kapitel 7.3 *Erwärmung integraler und lokal verstärkter*). Die vorhandene, zeitabhängige Steuerung (vgl. Anhang 13.6) ist demnach theoretisch in der Lage, den Harzfluss bei der Injektion über die örtlich einstellbare Temperatur des Preforms zu beeinflussen. Dies kann derart geschehen, dass durch ein entsprechendes Bestromungsmuster höher erwärmte oder kältere Zonen bewusst generiert werden, die dazu dienen können, die Fließeigenschaften des eingeleiteten Harzes durch lokale Viskositätsveränderungen zu beeinflussen (vgl. Viskositätskurven Abbildung 9.2-1). Dies wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter ausgeführt.

## 9.4 Ansatz eines optimierten RTM-Fertigungsprozesses

Im nachstehend aufgeführten Beispiel wird durch die Infiltration der Kohlenstofffaserpreform und der sich anschließenden thermischen Aushärtung ein flächig ausgedehntes Bauteil mit einseitig angebundener Verstärkungsstruktur hergestellt. Dieses integrale Demonstratorbauteil soll ein Ausschnitt einer Rumpfschale mit einem sogenannten Omegastringer repräsentieren und damit die Vorteile des Bestromungskonzeptes zur Bauteilerwärmung für komplexere Geometrien herausstellen. Der Einsatz der hier beschriebenen, speziell ausgebildeten Injektionsformschalen für einen RTM-Herstellungsprozess ermöglicht die Nutzung der Preform selbst als elektrische Widerstandsheizung.

Damit eine praktikable Realisierung des vorgestellten Verfahrens mit bestromten Injektionsformschalen zur Erstellung von Kohlenstofffaserverbundbauteilen in einem serienkompatiblen RTM-Prozess möglich ist, muss die der beschriebenen Formschale umgebende Aufnahme entsprechend ausgeführt sein [117, 118]. Hierzu wird eine für die erstellten Formschalen entsprechende Aufnahme, welche die wesentlichen Komponenten zur Durchführung eines RTM-Prozesses beinhaltet, konzeptioniert und gefertigt. Der Versuchsformenträger ist aus Aluminium hergestellt und in Abbildung 9.4-1 (links) im Zusammenbau dargestellt. Das RTM-Werkzeug ist so konzipiert, dass alle notwendigen Anschlüsse – mit Ausnahme der Medienversorgung für die zwei integrierten Auswerfersysteme – am Deckel platziert sind. Das Werkzeug ist in Abstimmung zu den erstellten Formschalen (vgl. Abbildung 9.1-1 und Abbildung 9.4-1 (rechts)) mit einem Harzeinlass sowie einem Harzauslass versehen. Es ist ein automatisierter, pneumatisch betriebener Injektionskopf vom Typ Turbo Autosprue (Firma Plastech TT Ltd.) anmontiert, der eine definiert steuerbare Injektion ermöglicht. Bei der Konzeptionierung



des Fertigungssystems wurde darauf geachtet, dass die derzeit für Großserienproduktionen eingesetzten 3K-Hochdruckinjektionsköpfe ebenso verwendet werden können, ohne dass sie einen negativen Einfluss auf den Prozess haben. Im Zusammenspiel mit einem entsprechenden Vakuumschließstein kann eine autonome und reinigungsoptimierte Injektion stattfinden.

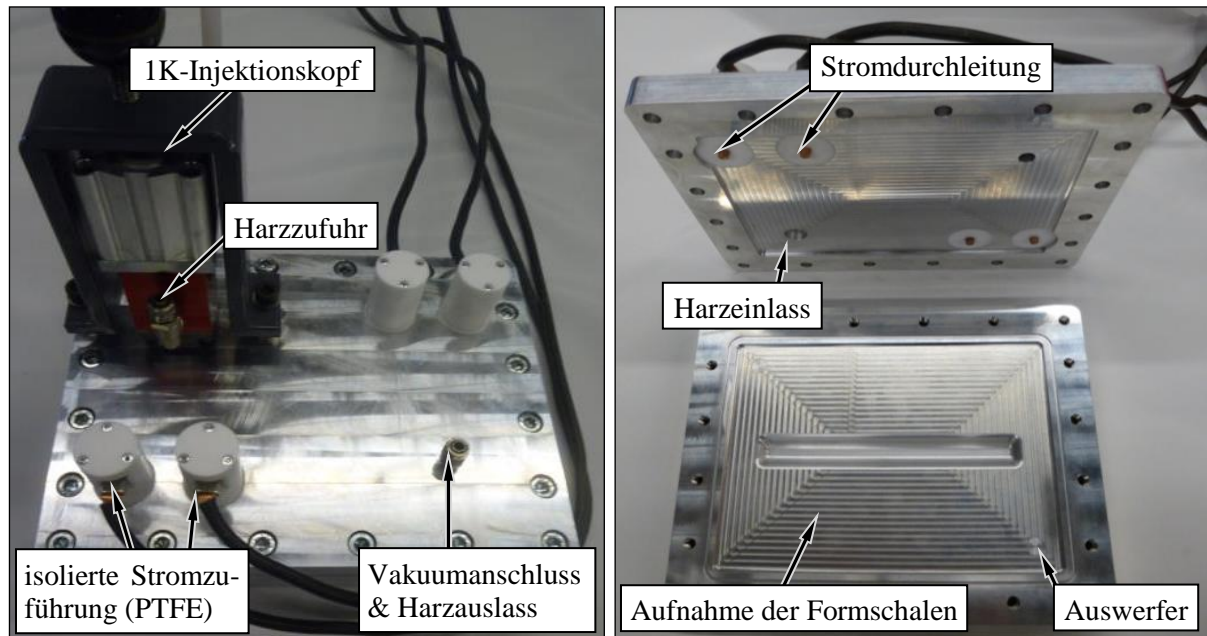


Abbildung 9.4-1: Versuchsfertigungsmittel zur Erzeugung von bestromten RTM-Bauteilen (links) und Innenansicht einer geöffneten Aufnahme ohne GFK-Formschale (rechts)

Die vier in den Formschalen eingebrachten Kupferelektroden werden durch getrennte Stromleitungen mit der Steuerung verbunden, um eine homogene Erwärmung des Preforms zu ermöglichen. In Abbildung 9.4-1 (rechts) ist die geöffnete Aufnahme der Formschalen mit diesen separat durchgeführten und isolierten Kupferzuleitungen erkennbar. Die Abbildung 9.4-2 zeigt schematisch das bestromte RTM-Werkzeug mit im Inneren platzierten Formschalen mitsamt der eingelegten Preform in seinem bereits geschlossenen Zustand in einer Schnittdarstellung. Durch die im Randbereich der Formschale umlaufend auf ihrer Innenseite verlaufende Nut – zur Aufnahme einer umlaufenden Dichtung – werden diese nach außen gegen Harzaustritt abgedichtet. Der Reinigungsaufwand nach dem Aushärteprozess wird somit auf den Bereich innerhalb der Formschalen begrenzt. Die Kupferelektroden auf der Unterschale verlaufen bei der konzipierten und dargestellten Variante unter diesen betreffenden Bereich und ermöglichen somit eine Stromzufuhr ohne eine ansonsten erforderliche separate Abdichtung. Wenn das Werkzeug belegt und verschlossen ist, wird der zunächst noch trockene Preform mittels Direktbestromung auf Injektionstemperatur erwärmt und dann über einen Harzzufuhrkanal mit einem Matrixmaterial (beispielsweise einem Epoxidharzsystem) infil-

triert. Vor oder während dieser Harzinjektion kann eine Vakuumierung der Werkzeugkavität über einen Luft- bzw. Harzauslasskanal erfolgen, um das Infiltrationsergebnis zu verbessern.

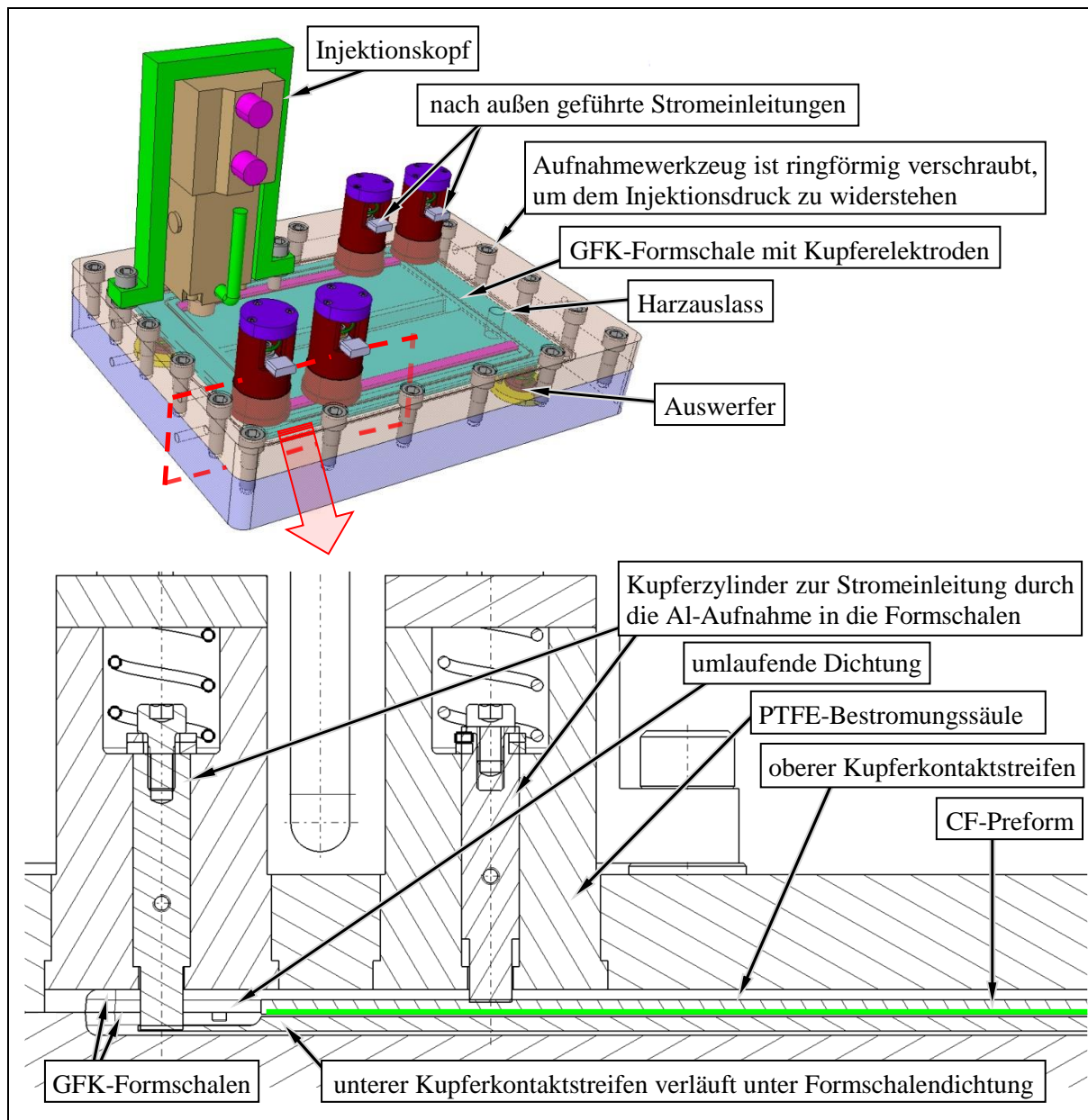


Abbildung 9.4-2: Hauptkomponenten eines direkt bestromten RTM-Werkzeugs mit Injektionsformschalen in einer Schnittdarstellung

In Abbildung 9.4-2 sind die elektrischen Kontakte zu erkennen, die jeweils in Form von Kontaktstreifen ausgeführt sind. Diese ermöglichen eine Bestromung der Preform gleichzeitig von oben und unten. Für eine gegenseitige Abdichtung der beiden Formschalen in deren Randbereichen ist eine umlaufende Dichtung integriert.

Bei der veranschaulichten Verwendung der Formschalen zur Herstellung eines Faser-verbundbauteils durch eine thermische Aushärtung der Preform wird eine Bestromung

durch die elektrischen Kontakte der Formschalen durchgeführt, um ein Widerstandsheizen der Preform zu bewerkstelligen. Die elektrische Isolierung der Kavität könnte auch ohne Formschalen erzeugt werden, indem isolierende Lacke oder Folien zur Anwendung kommen. Ein Vorteil bei der Verwendung von Formschalen ist eine geringere bis keine Verschmutzung der die Werkzeugkavität begrenzenden Werkzeugeile. Dieser Vorzug hat – insbesondere bei einer Serienfertigung von Faserverbundbauteilen – große wirtschaftliche Bedeutung. Darüber hinaus können kleinere Änderungen der Bauteilgeometrie kostengünstig durch eine entsprechende Änderung der Formschalengeometrie realisiert werden ohne die wesentlich teureren Werkzeugeile modifizieren zu müssen.

Das entwickelte Werkzeugkonzept eignet sich somit insbesondere für die Serienfertigung von Faserverbundbauteilen und ermöglicht eine signifikante Verringerung der zur Beheizung der Werkzeugkavität bzw. der Preform erforderlichen Energie. Da die notwendige Zuhaltekraft der Formhälften während der Injektion am größten ist und danach abflacht, kann das Bauteil theoretisch schon vor der vollständigen Vernetzung aus dieser entnommen werden. Somit könnten die Formschalen vorzeitig aus der Zuhalteaufnahme entnommen und außerhalb der Presse in den Formschalen weiter temperiert werden, bis die gewünschte Glasübergangstemperatur erreicht ist. Dies würde die Pressenbelegungszeit weiter reduzieren. Hierzu ist lediglich eine temperaturabhängig geregelte Stromversorgung notwendig, die im Gegensatz zum derzeitigen Nachtemperzyklus im Ofen wesentlich schneller und energieeffizienter ablaufen würde. Durch die Überpressung des Faserhalbzeuges an den Kontaktzonen wird eine kontinuierliche Stromeinleitung vor und während der Harzinjektion sowie danach ermöglicht, da die Kohlenstofffasern in diesen Bereichen keine Harzbenetzung in orthogonaler Richtung erfahren. Später können diese Flächen auch für eine In-situ-Sensorik während des Einsatzes des Bauteils genutzt werden (vgl. [119]). Veränderungen von bauteilspezifisch erfassten Kalibrierungswiderstandswerten – infolge von Temperatur, Faserdehnungen oder Brüchen – können dann durch den Abgleich mit entsprechend während der Herstellung ermittelten Kennwerten interpretiert werden.

Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil des variothermen RTM-Verfahrens in Kombination mit den Injektionsformschalen ist, dass mehrere geometrieähnliche Injektionsformschalen ohne zusätzliche Rüstzeit in einer entsprechenden Werkzeugaufnahme gefertigt werden können. Ein entsprechendes Beispiel stellt die gewählte Demonstratorgeometrie der CFK-Verstärkungsstrebe dar. Die zu fügenden Ober- und Unterteile variieren lediglich in den mittleren Bereichen in der Höhe, um den Hohlkörper zu generieren. Dieser Unterschied kann in der Ausgestaltung der jeweiligen Formschalen aufgefangen werden, sodass die zugehörige Formschalenaufnahme in der Presse für beide Formschalentypen identisch ist. Kommt es bei einem anvisierten Doppelkavitätenwerkzeug zu Ausschussbauteilen, so kann der folgende Injektionsvorgang anstatt mit einer Bauteilober- und einer Bauteilunterhälfte mit den Formhälften für die entsprechenden Fehlteile bestückt werden. Bei einer Fehlfunktion oder bei Wartungsarbeiten können ganze Bauteile

kurzfristig und ohne größere Rüstzeit – zumal ein komplexer An- und Abkopplungsvorgang der Fluidheizung besonders bei heißen Werkzeugen entfällt – auf eine andere Station transferiert werden. Damit die Werkzeugkosten minimiert sowie die Flexibilität einer CFK-Bauteilproduktion maximiert werden kann, ist der Einsatz von standardisierten Formschalenaufnahmen sinnvoll. Dabei kann das der Formschale ähnliche und notwendige Höhenprofil zu dessen Abstützung und Kraftaufnahme über Einsätze flexibel aufgebaut oder durch Hydraulikstempel (z. B. die flexible Fräsvorrichtung TORRESTOOL® der Firma M.TORRES) automatisiert eingestellt werden. Zum besseren Verständnis sind entsprechende Konzeptvorschläge anhand einer Werkzeughälfte zum Formschalengeometrievarianzkonzept in Abbildung 9.4-3 als schematische Schnittdarstellung illustriert.

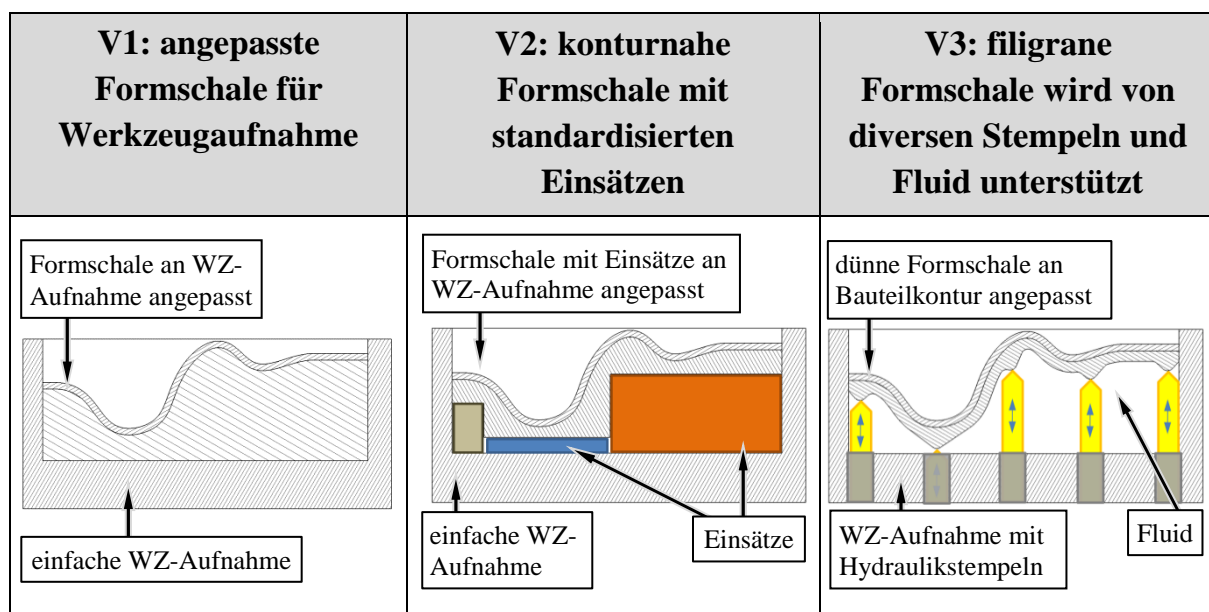


Abbildung 9.4-3: Konzepte zur Nutzung einer Aufnahme für eine Variantenvielfalt an Formschalen

Die Hydraulikstempel in Abbildung 9.4-3 (V3) könnten zusätzlich die Harzverteilung im inneren der Formschale durch definiert einstellbare Biegelinien positiv beeinflussen. Ferner kann zur gleichmäßigen Druckaufbringung auf die Formschalen ein in einer flexiblen Membran gekapseltes Fluid als Füllstoff genutzt werden, das dann zusätzlich zur Temperaturregulierung (vornehmlich Abkühlung) dienlich sein kann. Ein anderer Vorteil ist, dass bei Beschädigungen der Forminnenflächen oder bei einer geringfügigen Bauteiländerung lediglich eine neue Formschale gefertigt werden muss.

## 9.5 Energieverbrauch des optimierten Harzinjektionsverfahrens

Ein entsprechendes RTM-Vergleichswerkzeug wurde nach konventioneller Bauweise konstruiert und gefertigt, damit das Aufheizverhalten eines geschlossenen Verfahrens,



das auf direkter Stromeinleitung basiert, in guter Näherung mit einer herkömmlichen Erwärmungsvariante verglichen werden kann. Das hergestellte Referenzwerkzeug ist im Zusammenbau sowie zerlegt in Abbildung 9.5-1 (links) zu sehen. Zudem ist das Aufheizsimulationsergebnis für eine Fluidbeheizung durch die in der Kavität und im Deckel integrierten Heizkanäle sowie eine entsprechende Schnittdarstellung des Testwerkzeuges in Abbildung 9.5-1 (rechts) dargestellt.

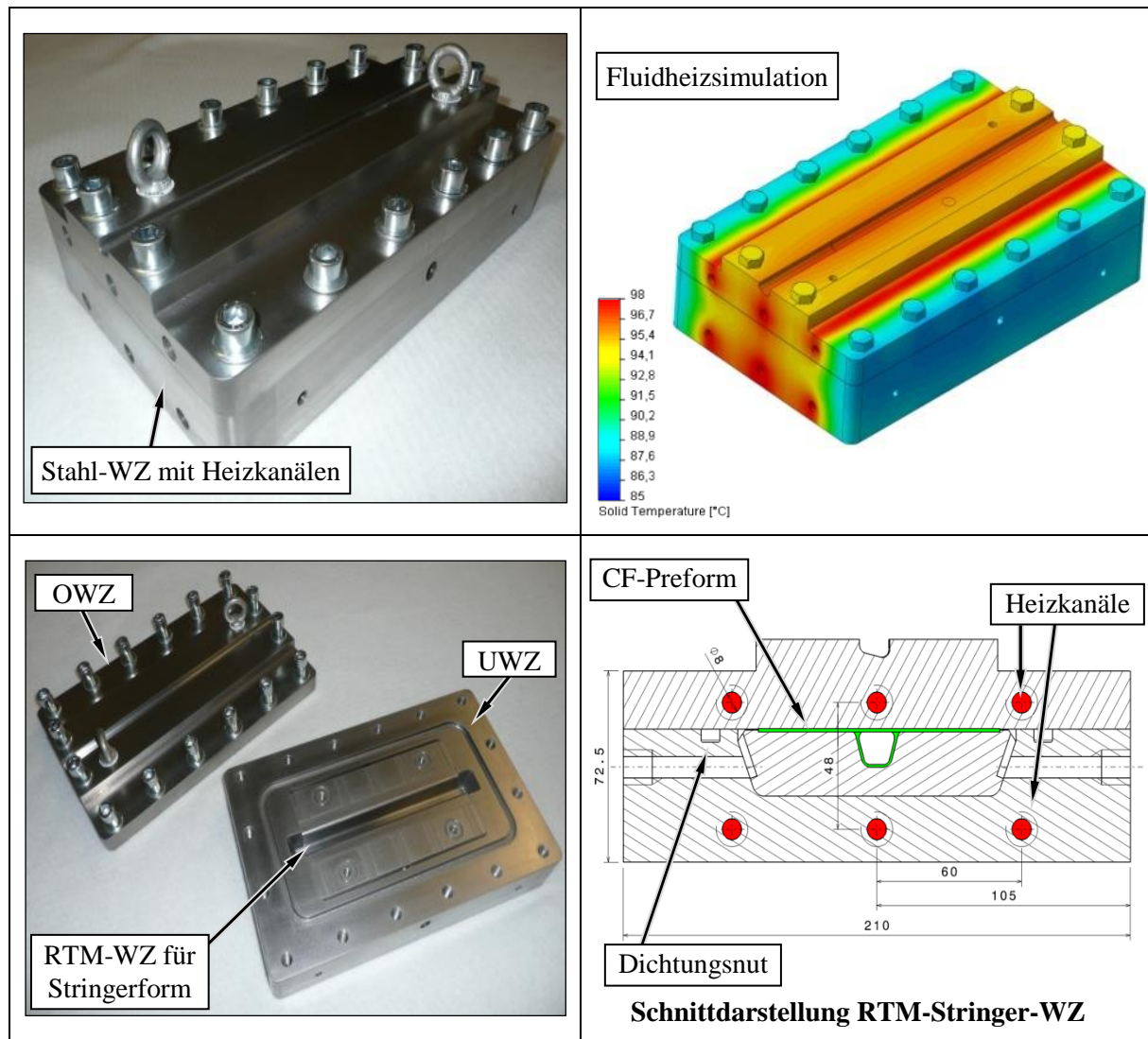


Abbildung 9.5-1: RTM-Stahlwerkzeug mit identischer Stringer-Bauteilgeometrie

Dieses gängige Stahlwerkzeug (Material: DIN EN 10025-3 – 1.0545) ist in der Lage, die gleiche Bauteilkontur im konventionellen RTM-Verfahren zu erzeugen. Die Erwärmung des Preforms erfolgt dabei in einer ersten Variante über die innen liegenden Werkzeugwandungen, die durch zwei äußere elektrische Heizungen erhitzt werden. Die Heizplatten sind jeweils mit einer Heizfläche von 260 mm x 300 mm und einem Unterbau zur Wärmedämmung aus 50 mm starken Graphitschaum (Firma GrafTech, Typ FPA-20) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,21 W/mK ausgestattet.

Die folgende Abbildung 9.5-2 zeigt das Stahlwerkzeug mit diesen doppelseitig angebrachten elektrischen Heizplatten sowie das sich einstellende Wärmebild des Versuchsaufbaus.

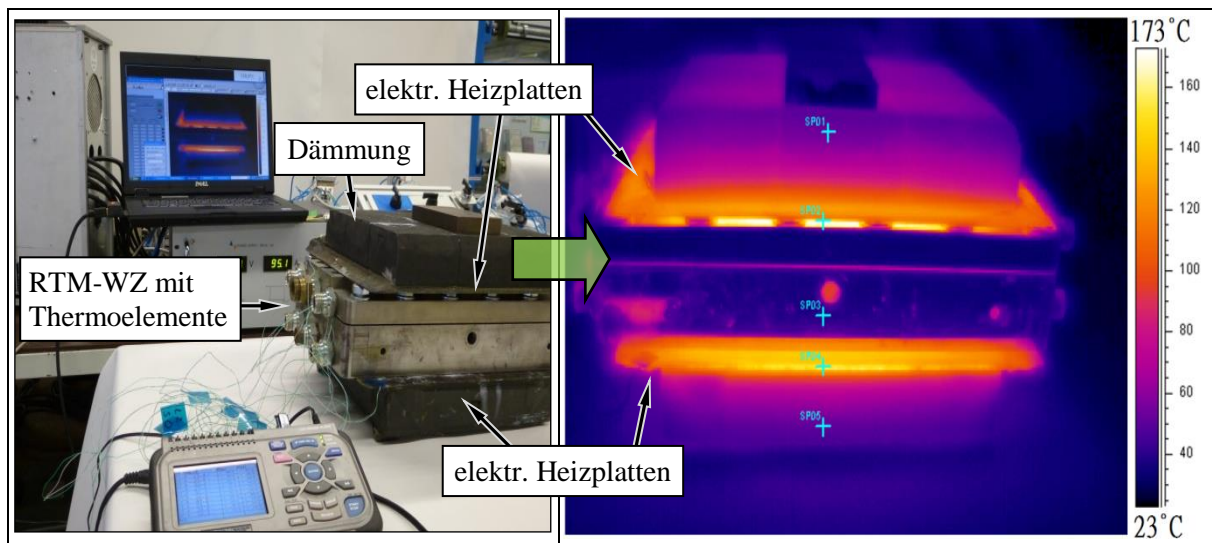


Abbildung 9.5-2: RTM-Stahlwerkzeug mit beidseitig angefügten elektrischen Kontaktheizungen

Des Weiteren wird in einer zweiten Aufheizvariante die Aufheizdauer für dieses Werkzeug mittels integrierter Heizkanäle ermittelt. Dazu werden die drei im Deckel sowie die drei in der Kavität eingebrachten Heizkanäle mit Wasser durchflutet, das mittels Temperiergerät (Regloplas P160M) erwärmt wird.

Aus den aufgezeichneten Werten der Aufheizversuche mit der konventionellen Werkzeugvariante und identischem Preform zeigt die Fluidbeheizung steilere Aufheizrampen gegenüber der doppelseitigen Heizplattenvariante. Allerdings benötigt die Fluidheizung hierfür auch wesentlich mehr Energie. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, dass das Heizfluid selbst erst auf die notwendige Erwärmungstemperatur aufgeheizt werden muss und die aufzuheizende Masse dementsprechend höher ist als bei der Variante mit elektrischen Heizplatten. Die Energie zur Temperaturerhöhung ist von der zu erzeugenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , der Aufheizzeit  $t$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c$  sowie der Masse  $m$  des Mediums abhängig. Die aufzubringende theoretische Leistung  $P$  ohne Verlustleistung durch Konvektion oder Strahlung errechnet sich dann nach der bereits in Kapitel 2.3.3.3 genannten Gleichung:

$$P = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (2-2)$$

Da im Gegensatz zur Erstellung von CF-Preforms und CF/TP-Bauteilen beim RTM-Fertigungsverfahren die Erwärmung innerhalb des formgebenden Werkzeugs erfolgen

muss, spielt gerade bei variothermen Prozessen die den Preform umgebende, aufzuheizende Masse eine entscheidende Rolle. Aus der Gleichung (2-2) geht hervor, dass diese aufzuheizende Masse die einzig beeinflussbare Größe ist, um die notwendige Leistung zu reduzieren, da die spezifischen Wärmekapazitäten, die zu erreichende Temperaturdifferenz sowie die Aufheizzeit für kurze Zykluszeiten vordefiniert sind. Diese aufzuheizende Masse wird durch die dem aufzuheizenden Preform umgebenden Injektionsformschalen – je nach dessen Wandstärke bzw. Wärmedämmeigenschaften – reduziert. Die benötigten Energieverbräuche zum Aufheizen des CF-Preforms im RTM-Werkzeug – nach herkömmlicher und neuentwickelter Variante mittels direkter Stromeinleitung – sind in der nachstehenden Abbildung 9.5-3 gegeneinander aufgetragen.

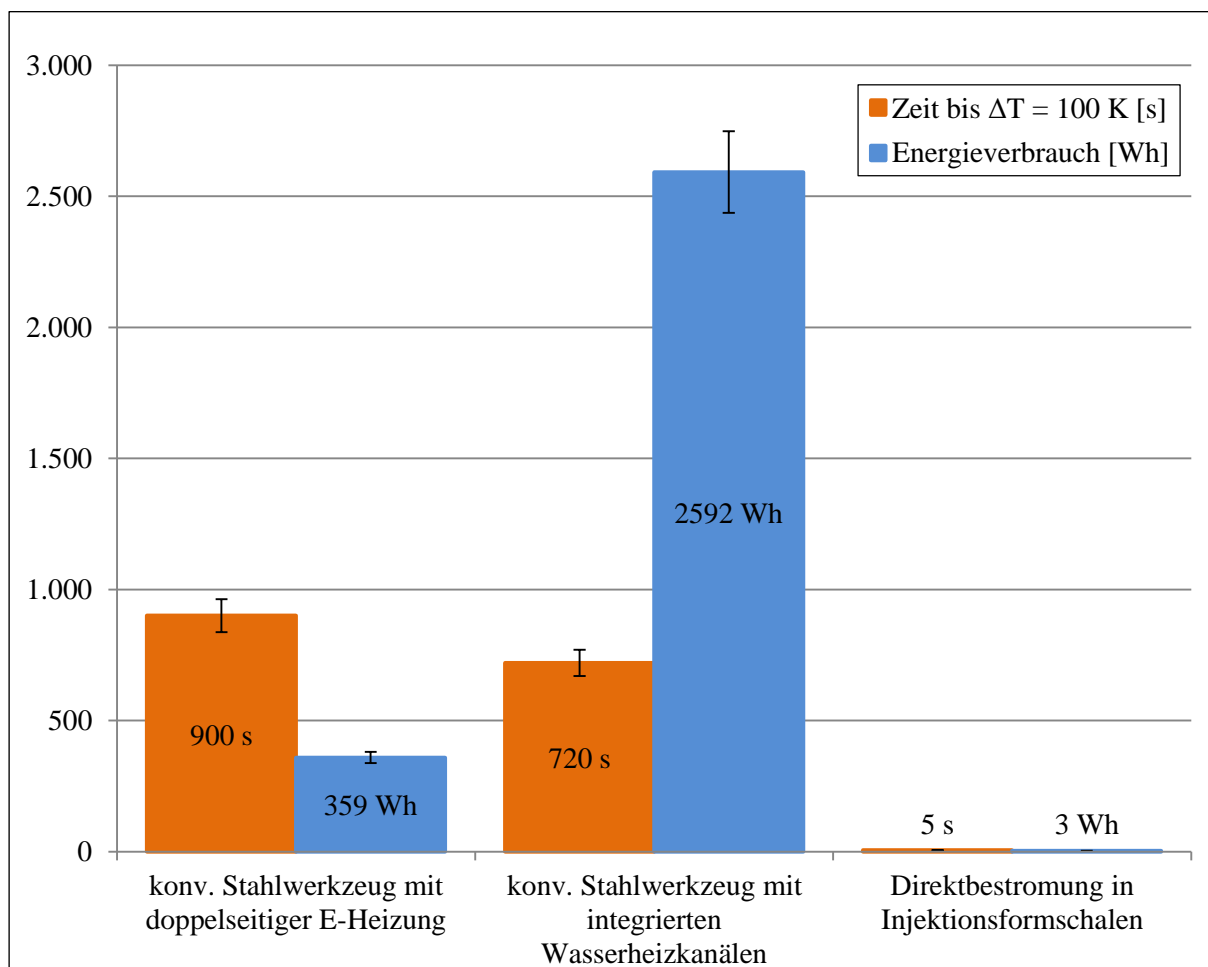


Abbildung 9.5-3: Gegenüberstellung der Energieverbräuche und Aufheizzeiten der drei Erwärmungsvarianten für die identische NCF-Demonstratorgeometrie

Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Direktbestromungsvariante innerhalb einer geschlossenen Formschale die Aufheizzeit sowie die dafür benötigte Energie reduziert. Das Direktbestromungsprinzip, kombiniert mit den entworfenen Injektionsformschalen, reduziert den Energieverbrauch um 99,2 % gegenüber einer elektrischen Kontaktheizung und um 99,9 % zu einem mittels einer Fluidheizung betriebenen Werkzeug bei



einer zu erreichenden Temperaturdifferenz von 100 K. Somit wird gegenüber den herkömmlichen Erwärmungsvarianten nur noch 0,8 % bzw. 0,1 % Energie für die Erwärmung benötigt.

In einem Serienprozess wird das RTM-Werkzeug vornehmlich in einer Aufheizstation auf Prozesstemperatur erwärmt und muss während des Fertigungsprozesses lediglich diese aufrechterhalten, da größtenteils ein isothermer Prozess gefahren wird. Damit ist dieser enorme Vorteil der Direktbestromung für einen derzeitig üblichen RTM-Fertigungsprozess in Bezug auf die Erwärmung nur noch sehr gering. Das größte Potenzial der Injektionsformschalen zur Stromeinleitung in den CF-Preform liegt – neben der Reduktion der Reinigungs- und Pressenbelegungszeit – in den schnellen und energieeffizienten Aufheizrampen und damit in einer variothermen Prozessführung.

## 10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Es wurde deutlich, dass die Direktbestromung von Kohlenstofffasern möglich ist und zu einer eindeutig energieeffizienteren und schnelleren Produktion von CFK-Bauteilen beitragen kann. Die folgende Wirtschaftlichkeitsanalyse soll darstellen, welche ökonomischen Effekte sich bei der Umstellung einer herkömmlichen CFK-Bauteilproduktion auf ein Direktbestromungskonzept ergeben. Hierfür werden die bereits behandelten Verfahren (Preform-Prozess, RTM-Prozess sowie der Erwärmungsprozess für das Umformen von Organoblechen) mit Hilfe von repräsentativen Demonstratorbauteilen abgebildet und analysiert.

Neben allgemeinen Angaben zu den Prozessen werden für die Betrachtung die experimentell ermittelten Daten der Herstellung eines Strukturbauteils in Form einer CFK-Verstärkungsstrebe im Preform- und RTM-Prozess genutzt. Für die Erwärmung von Organoblechen zum dreidimensionalen Umformen können anhand der durchgeführten Versuche mit der Omegademonstratorgeometrie entsprechende Ableitungen getroffen werden. Des Weiteren werden für die Darstellung der Wirtschaftlichkeit die neuen Fertigungsverfahren den bisher angewandten und fest etablierten gegenübergestellt. Mittels der genannten Referenzbauteile kann dann der wirtschaftliche Mehrwert aufgezeigt werden. Außerdem wird ein exemplarischer Output für die jeweiligen Prozesse und Simulationsbauteile festgelegt, auf welchem die anschließenden Berechnungen beruhen.

## 10.1 Preformherstellungsprozess

Das bereits in Kapitel 7.4 beschriebene Fertigungskonzept zur Preformherstellung sieht vor – im Gegensatz zum weniger effizienten Bestrahlungsprozess mittels Infrarotstrahlen – die Kohlenstofffasern durch Direktbestromung bereits während des Transportes zu erwärmen. Für die Analyse des Preforming-Prozesses wird das Demonstrationsbauteil einer Versteifungsstruktur verwertet, das sich aus einem Oberteil und einem Unterteil zusammensetzt (vgl. Abbildung 7.2-3). Für die im Folgenden aufgeführte Beispielrechnung werden fiktive Eingangsgrößen gewählt, die den derzeitigen Stand grob widerspiegeln und primär dazu dienen sollen, den Unterschied der Verfahren zu verdeutlichen. Bezüglich der Einmalkosten kann festgehalten werden, dass die Investitionen für einen Direktbestromungsendeffektor ungefähr gleich mit den Anschaffungskosten eines IR-Heizfeldes samt der zugehörigen zweifachen Handhabungsgestellen für den Transfer der Halbzeuge ist. Es wird im Fertigungsszenario ein geplanter Output von 50.000 Einheiten festgelegt, um die resultierenden Prozesskosten aufzuzeigen.

Damit dieser Output generiert wird, müssen also 50.000 Oberteil-Preforms sowie 50.000 Unterteil-Preforms produziert werden; also insgesamt 100.000. Weitere Faktoren, welche die Prozesskosten beeinflussen, sind der Maschinenstundensatz, die Maschinenverfügbarkeit sowie der Strompreis. Es wird von 100.000 zu produzierenden Bauteilen ausgegangen sowie von einer Belegung von jeweils einer Presse pro Prozess. Die Anschaffungskosten werden in der Berechnung nicht berücksichtigt. Hierfür wird lediglich der Maschinenstundensatz einbezogen. Folgende Daten fließen in die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit ein:

<b>Maschinenstundensatz (inkl. Arbeitskraft)</b>	180 €
<b>Maschinenverfügbarkeit</b>	97 %
<b>Strompreis</b>	0,09 € pro kWh
<b>Arbeitszeit</b>	1 Jahr à 50 Wochen à 5 Tage à 7 Stunden
<b>Fehlteilquote</b>	0 %
<b>Output</b>	50.000 (Oberteil) + 50.000 (Unterteil) = 100.000

Tabelle 10.1-1: Vorgaben für den exemplarischen Preformherstellungsprozess

Pro Halbzeug ergeben sich für den jeweiligen Prozess folgende Parameter:

	<b>Infrarotheizfeld</b>	<b>Direktbestromung</b>
<b>Prozessdauer</b>	185 s	55 s
<b>Energieverbrauch</b>	461,9 Wh	15,1 Wh

Tabelle 10.1-2: Zeit- und Energieverbrauch je Preformherstellungsvariante

Werden für den Fertigungsprozess jeweils eine Umformpresse inklusive der für die Erwärmung notwendigen Utensilien bereitgestellt, so ergeben sich folgende Outputmengen pro Zeiteinheit unter Einbeziehung der Maschinenverfügbarkeit von 97 %:

	<b>Infrarotheizfeld (3,03 Jahre)</b>	<b>Infrarotheizfeld, 3 Fertigungsstraßen (1,01 Jahre)</b>	<b>Direktbestromung (0,90 Jahre)</b>
<b>Pro Stunde</b>	19 Stück	57 Stück	64 Stück
<b>Pro Tag</b>	132 Stück	397 Stück	445 Stück
<b>Pro Woche</b>	661 Stück	1.984 Stück	2.224 Stück
<b>Pro Jahr</b>	33.062 Stück	99.187 Stück	111.209 Stück

Tabelle 10.1-3: Outputmengen pro Zeiteinheit je Preformherstellungsvariante

Insgesamt verkürzt sich die Prozesszeit durch die Direktbestromung um 70 %. Es wird somit nur noch 30 % der herkömmlichen Fertigungszeit für die gleiche Anzahl an Preforms benötigt. In diesem Falle wäre bei einer herkömmlichen Fertigungsstraße mit Infraroterwärmung ein Zeitraum 3,03 Jahren notwendig, um die 100.000 Bauteile zu produzieren. Der Direktbestromungsprozess dagegen würde den gewünschten Output in einem Zeitraum 0,90 Jahren bewältigen. Damit der identische Output in gleicher Zeit generiert werden kann, müssen beim Prozess mittels Infraroterwärmung zwei weitere Fertigungsstraßen mit den dazugehörigen Werkzeugen sowie zwei weitere Infrarotheizfelder angeschafft bzw. belegt werden. Dadurch steigen die Produktionskosten wie folgt:

<b>Infrarotheizfeld (3,03 Jahre)</b>	<b>Infrarotheizfeld (0,85 Jahre)</b>	<b>Direktbestromung (1,03 Jahre)</b>
Umformwerkzeug: 15.000 €	3 Umformwerkzeuge: (à 15.000 €): 45.000 €	Umformwerkzeug: 15.000 €
IR-Heizfeld: 27.500 €	3 IR-Heizfelder: (à 27.500 €) 82.500 €	Endeffektor für Direktbestromung: 38.000 €
		Netzteil: 5.000 €
<b>Total: 42.500 €</b>	<b>Total: 127.500 €</b>	<b>Total: 58.000 €</b>

Tabelle 10.1-4: Anschaffungskosten je Preformherstellungsvariante

Die Anschaffungskosten für zwei weitere Fertigungsstraßen in Höhe von jeweils ca. 600.000 € gehen nicht in die Berechnungen mit ein. Für die weitere Verwendung dieser Ergebnisse sollten diese Ausgaben jedoch bedacht werden. Verwendet werden für die Berechnung lediglich die Maschinenstundensätze.

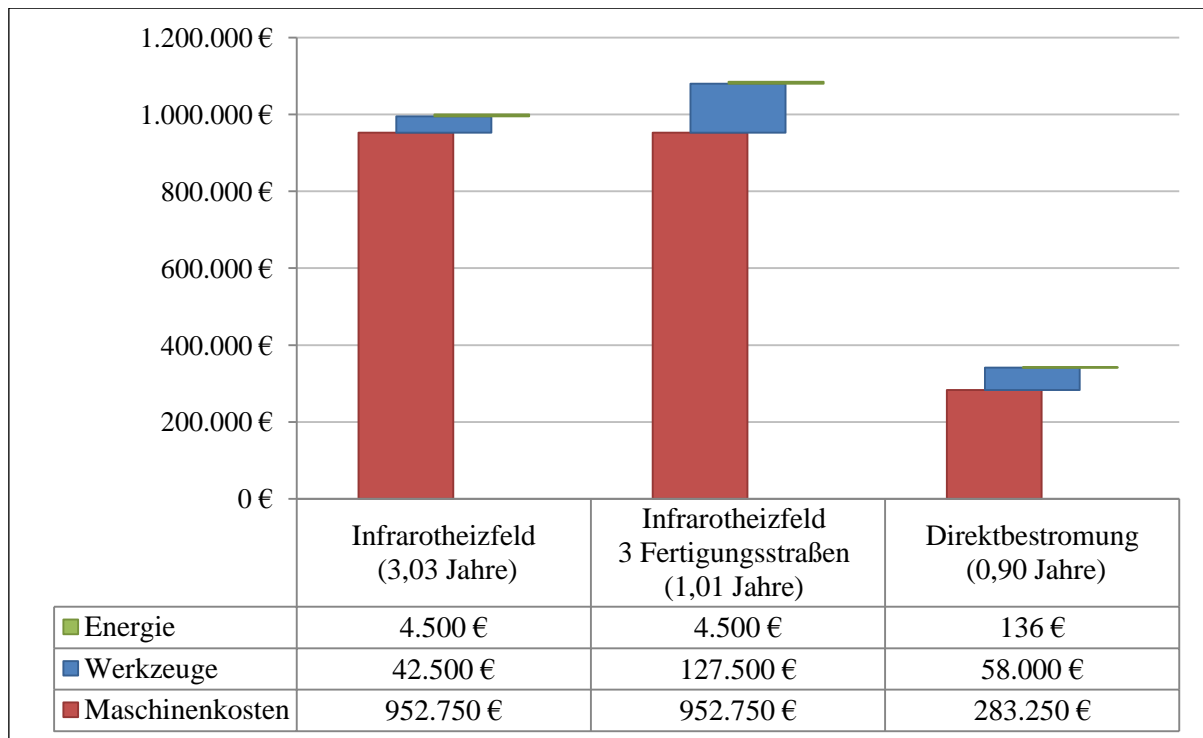


Abbildung 10.1-1: Produktionskostenvergleich verschiedener Preformherstellungsverfahren

Beim Vergleich des infrarotgestützten Prozesses mit dem direkt bestromten Prozess für die Produktion innerhalb eines Jahres wird deutlich, dass bereits die Anschaffungskosten der Heizfelder und Presswerkzeuge deutlich höher liegen als diejenigen für den Direktbestromungsprozess. Für die Produktion der Teile mittels IR-Heizfelder bleiben die Kosten für Energie und Maschinen inklusive Arbeitskraft gleich. Dies liegt daran, dass nicht mehr eine Maschine in drei Jahren, sondern drei Maschinen in einem Jahr die gleichbleibende Stückzahl produzieren. Die anfallenden Energiekosten werden um 97 % durch den Einsatz des Direktbestromungskonzeptes gesenkt, haben jedoch in diesem Rechenbeispiel nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten.

Es ergeben sich folgende Gesamtkosten für den reinen Betrieb:

**eine Fertigungsstraße mit Infrarotheizfeld (100.000 Stück in 3,03 Jahren):**

➔ 999.750 € (ohne die Investitionen für eine Presse)

**drei Fertigungsstraßen mit Infrarotheizfeld (100.000 Stück in 1,01 Jahren):**

➔ 1.084.750 € (ohne die Investitionen für drei Pressen)

**Direktbestromungskonzept (100.000 Stück in 0,90 Jahren):**

➔ 320.786 € (ohne die Investitionen für eine Presse)

Aus den Ergebnissen ist zu schließen, dass bei einem Output von 100.000 Teilen die Kosten beim Direktbestromungskonzept (Dauer: 0,90 Jahre) gegenüber einem Prozess

mit Infrarotbestrahlung (Dauer: 3,03 Jahre) um 68 % (678.964 €) sinken. Soll der Prozess mit Infrarotbestrahlung ebenfalls innerhalb von einem Jahr (1,01 Jahre) beendet sein, so erhöht sich die Ersparnis sogar auf 70 % (763.964 €). Das untersuchte Fertigungskonzept mit direkter Stromeinleitung in die Kohlenstofffaserhalbzeuge benötigt somit nur noch 30 % der anfallenden Gesamtkosten für den Betrieb gegenüber einer herkömmlichen Fertigungsstraße. Hinzukommen die ggf. anfallenden Beschaffungskosten für zwei zusätzliche Fertigungsstraßen, falls diese noch nicht vorhanden sind. Für die Produktion mittels Infrarotbestrahlung innerhalb von drei Jahren (3,03 Jahre) bzw. der Produktion mittels Direktbestromung innerhalb eines Jahres (0,90 Jahre) wird lediglich eine Umformpresse benötigt.

## 10.2 Organoblechumformung

In dieser Analyse werden kleinere CF/TP-Verbindungsbauteile, sogenannte Clips, wie sie auch bereits in Kapitel 8 behandelt wurden, als Rechenbeispiel betrachtet. Durch den Einsatz der Bestromungstechnik zum Erwärmen von Organoblechen steht insbesondere die verkürzte Prozessdauer im Vordergrund. Es wird ein Output von 80.000 Clips angenommen. Als Bedingung muss die Herstellung dieser bei den Prozessen in einem gleichen Zeitraum geschehen.

Folgende Daten fließen in die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit ein:

<b>Maschinenstundensatz (inkl. Arbeitskraft)</b>	180 €
<b>Maschinenverfügbarkeit</b>	95 %
<b>Strompreis</b>	0,09 € pro kWh
<b>Arbeitszeit</b>	1 Jahr à 50 Wochen à 5 Tage à 7 Stunden
<b>Fehlteilquote</b>	0 %
<b>Output</b>	80.000 Stück

Tabelle 10.2-1: Vorgaben für den exemplarischen CF/TP-Bauteilherstellungsprozess

Pro Bauteil ergeben sich für den Prozess folgende Parameter:

	<b>Infrarothelfeld</b>	<b>Direktbestromung</b>
<b>Prozessdauer</b>	128 s	81 s
<b>Energieverbrauch</b>	58,9 Wh	9,8 Wh

Tabelle 10.2-2: Zeit- und Energieverbrauch je CF/TP-Bauteilherstellungsvariante

Aus der Tabelle 10.2-2 wird nochmals die verkürzte Prozesszeit von 63 % verdeutlicht. Ebenfalls ist der reduzierte Energieverbrauch angegeben. Dieser sinkt um 83,4 %, hat jedoch bei diesem Rechenbeispiel an den Gesamtproduktionskosten nur einen minimalen Anteil. Die folgende Tabelle 10.2-3 liste die Outputmengen pro Zeiteinheit der jeweiligen Produktionsvarianten auf.

	<b>CF/TP mit Infrarotheizfeld (1,7 Jahre)</b>	<b>CF/TP mit IR, 2 IR-Fertigungsstraßen (0,85 Jahre)</b>	<b>CF/TP mit Direktbestromung (1,03 Jahre)</b>
<b>Pro Stunde</b>	27 Stück	54 Stück	44 Stück
<b>Pro Tag</b>	188 Stück	375 Stück	311 Stück
<b>Pro Woche</b>	938 Stück	1.875 Stück	1.556 Stück
<b>Pro Jahr</b>	46.875 Stück	93.750 Stück	77.778 Stück

Tabelle 10.2-3: Outputmengen pro Zeiteinheit je CF/TP-Bauteilherstellungsvariante

Aus der nachstehenden Tabelle 10.2-4 ist zu entnehmen, dass die Anschaffungskosten für die Produktion in einem gleichen Zeitraum doppelt so hoch ausfallen.

<b>Infrarotheizfeld (1,7 Jahre)</b>	<b>Infrarotheizfeld (0,85 Jahre)</b>	<b>Direktbestromung (1,03 Jahre)</b>
IR-Heizfeld: 25.000 €	2 IR-Heizfelder: 50.000 € (à 25.000 €)	Endeffektor: 20.000 €
		Netzteil: 5.000 €
<b>Total: 25.000 €</b>	<b>Total: 50.000 €</b>	<b>Total: 25.000 €</b>

Tabelle 10.2-4: Anschaffungskosten je CF/TP-Bauteilherstellungsvariante

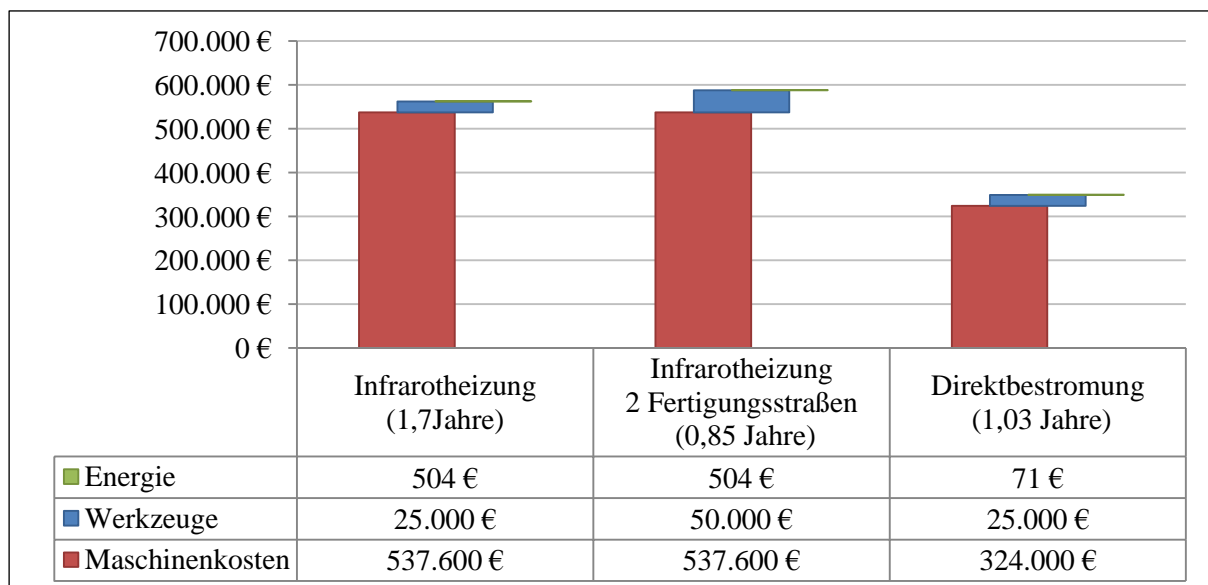


Abbildung 10.2-1: Produktionskostenvergleich verschiedener CF/TP-Bauteilherstellungsvarianten

Es ergeben sich somit folgende Gesamtkosten für den reinen Betrieb:

**eine Fertigungsstraße mit Infrarotheizfeld (80.000 Stück in 1,7 Jahren):**

➔ 563.104 € (ohne die Investitionen für eine Presse)

**drei Fertigungsstraßen mit Infrarotheizfeld (80.000 Stück in 0,85 Jahren):**

➔ 588.104 € (ohne die Investitionen für **zwei** Pressen)

**Direktbestromungskonzept (80.000 Stück in 1,03 Jahren):**

➔ 349.071 € (ohne die Investitionen für eine Presse)

Die Ergebnissen machen deutlich, dass bei einem Output für Energie von 80.000 Organoblechen mit dem direkt bestromten Fertigungsprozess die Kosten gegenüber dem Aufheizen mit Infrarotbestrahlung lediglich um 433 € sinken. Dies hängt mit den geringen Abmaßen des aufzuheizenden Halbzeuges und den damit anteilig geringen Verlustleistungen zusammen. Prozentual werden 85,9 % an Energie eingespart, was bei größeren Bauteilen zu höheren absoluten Einsparungen führt. Da für die Produktion des Outputs jeweils der annähernd gleiche Zeitraum angenommen wird, erhöht sich die notwendige Investition für die Werkzeuge bei einem vergleichbaren Prozess mit Infrarotbestrahlung auf 50.000 €. Hierdurch stehen am Ende Produktionskosten von 588.104 € bei der Infrarotbestrahlung lediglich 349.071 € gegenüber, woraus sich eine Ersparnis von 239.033 € und somit 41 % ergibt.

## 10.3 Injektions- und Aushärteprozess

Für die wirtschaftliche Darstellung des RTM-Prozesses wird das bereits in Kapitel 7.2 beschriebene Demonstratorbauteil einer CFK-Versteifungsstruktur (vgl. Abbildung 7.2-3) mit den ermittelten Prozesszeiten aus Vorversuchen analysiert. Im Vordergrund soll dabei die Zeitersparnis stehen, die aus der Umstellung eines isothermen zu einer variothermen Prozesssteuerung – verbunden mit der Verwendung von Injektionsformschalen – resultiert.

In der Analyse wird der konventionelle isotherme Prozess dem neuen variothermen Prozess gegenübergestellt, wobei beide Bauteilherstellungsvarianten Berücksichtigung finden. Die Vergleiche erfolgen jeweils einmal unabhängig von den unterschiedlichen Produktionszeiten, die für den Output benötigt werden, und einmal bei Fertigung des Outputs in einem gleichlangen Zeitraum. Als beispielhafter Output werden 39.500 Bauteile festgelegt. Weitere Faktoren, welche die Prozesskosten beeinflussen, sind der Maschinenstundensatz, die Maschinenverfügbarkeit sowie der Strompreis. Folgende Daten fließen in die Berechnung mit ein:



<b>Maschinenstundensatz (inkl. Arbeitskraft)</b>	180 €
<b>Maschinenverfügbarkeit</b>	97 %
<b>Strompreis</b>	0,09 € pro kW/h (ohne Steuern)
<b>Arbeitszeit</b>	1 Jahr à 50 Wochen à 5 Tage à 7 Stunden
<b>Fehlteilquote</b>	0 %
<b>Output</b>	39.500 Stück

Tabelle 10.3-1: Vorgaben für den Herstellungsprozess einer CFK-Versteifungsstruktur

Für die Analyse der Produktion des Beispielbauteils werden zwei Preforms (Ober- und Unterteil) zeitgleich in ein Doppelkavitätenwerkzeug eingelegt, injiziert und nach der Aushärtung zu einer fertigen CFK-Verstärkungsstrebe vereint. Für die jeweiligen RTM-Prozesse werden folgende Werte ermittelt und verwendet:

<b>Isothermer RTM-Prozess</b>		<b>Variothermer RTM-Prozess</b>	
<b>Prozessschritt</b>	<b>Zeit [s]</b>	<b>Optimierter Prozessschritt</b>	<b>Zeit [s]</b>
Preform einlegen	10	→ Handhabung Formschalen	8
Werkzeug schließen	8		8
Vakuum ziehen	15		15
Injizieren	23	→ Harzflussoptimierung	21
Aushärten	180	→ höhere Aushärtetemperatur	81
Werkzeug öffnen	10		10
Entformen	14	→ Handhabung Formschalen	12
Reinigung WZ-OT	20	→ zeitparallel Reinigung Formschale OT	0
Kavität säubern	60	→ zeitparallel Reinigung Formschale UT	0

Tabelle 10.3-2: Zeiten und Prozessschritte beim iso- und variothermen RTM-Verfahren

In Tabelle 10.3-2 ist bereits zu erkennen, dass beim variothermen Prozess die Zeiten für die Reinigung – aufgrund der gegen Harzaustritt abgedichteten und auswechselbaren Injektionsformschalen – entfallen. Diese können nach der Entformung außerhalb des Werkzeuges gereinigt werden. Eine elastische Ausgestaltung dieser ist dabei hilfreich. Die Injektionsschalen können durch geschickt gewählte Adaptionenpunkte zudem besser gehandhabt werden, was zu einer weiteren Reduktion der Zykluszeit führt. Des Weiteren reduziert sich – aufgrund der gesteuerten Erwärmung und die damit verbundene optimierte Harzflussgestaltung – die Zeit für die Injektion um 9 %. Die notwendige Dauer zum Aushärten und Erreichen des vorgegebenen  $T_g$ -Wertes kann durch rasche Tempe-

aturerhöhung nach der vollständigen Infiltration um 55 % gegenüber dem herkömmlichen isothermen Prozess reduziert werden. Insgesamt verkürzt sich die Prozessdauer ebenfalls um 55 % von 340 s auf 155 s

Werden für die Prozesse jeweils eine Presse inklusive der für die Erwärmung notwendigen Utensilien – unter Einbeziehung einer Maschinenverfügbarkeit von 97 % – bereitgestellt, so ergeben sich folgende Outputmengen pro Zeiteinheit:

	<b>RTM-Isotherm (2,2 Jahre)</b>	<b>RTM-Isotherm, 2 Fertigungsstraßen (1,1 Jahre)</b>	<b>RTM-Variotherm mit Injektionsformschalen (1 Jahr)</b>
<b>Pro Stunde</b>	10 Stück	20 Stück	23 Stück
<b>Pro Tag</b>	72 Stück	144 Stück	158 Stück
<b>Pro Woche</b>	360 Stück	720 Stück	791 Stück
<b>Pro Jahr</b>	17.990 Stück	35.979 Stück	39.538 Stück

Tabelle 10.3-3: Outputmengen pro Zeiteinheit je RTM-Verfahren

Durch den Einsatz eines variothermen Prozesses steigert sich der mögliche Output pro Zeiteinheit um 119,7 %. Für die Produktion von 39.500 Bauteilen durch einen isothermen Prozess kann somit ein Zeitraum von 2,2 Jahren veranschlagt werden. Durch Einsatz einer variothermen Prozessdurchführung würde sich dieser Zeitraum jedoch auf nur ein Jahr begrenzen.

Für den RTM-Prozess entstehen folgende Anschaffungskosten:

<b>RTM-Isotherm (2,2 Jahre)</b>	<b>RTM-Isotherm, 2 Fertigungsstraßen (1,1 Jahre)</b>	<b>RTM-Variotherm mit Injektionsformschalen (1 Jahr)</b>
Werkzeug: 400.000 €	2 Werkzeuge: 800.000 € (à 400.000 €)	Endeffektor: 20.000 €
		Injektionsformschalen: 3.000 €
		Steuerung + Netzteil: 18.000 €
<b>Total: 400.000 €</b>	<b>Total: 800.000 €</b>	<b>Total: 266.000 €</b>

Tabelle 10.3-4: Anschaffungskosten je RTM-Bauteilherstellungsvariante

Die Anschaffungskosten von jeweils ca. 1,6 Mio. € für eine RTM-Presse fließen nicht in die Berechnung mit ein. Hierfür wird lediglich der Maschinenstundensatz einbezogen. Aus Tabelle 10.3-4 ist zu entnehmen, dass die Anschaffungskosten für die Produktionsmittel beim variothermen Prozess – bei annähernd identischer Durchlaufzeit – um 534.000 € geringer sind. Die Anschaffungskosten beim isothermen Prozess sind dem-

gegenüber fast dreimal so groß. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die komplexe Integration der Beheizung in das isotherme RTM-Werkzeug entfällt und das RTM-Werkzeug verschleißresistenter über die gesamte Stückzahl hinweg ausgeführt sein muss.

Mit Hilfe der Maschinenkosten pro Stück und den zugehörigen Anschaffungskosten für Produktionsmittel lässt sich die Ersparnis durch eine variotherme Prozessführung auch grafisch darstellen:

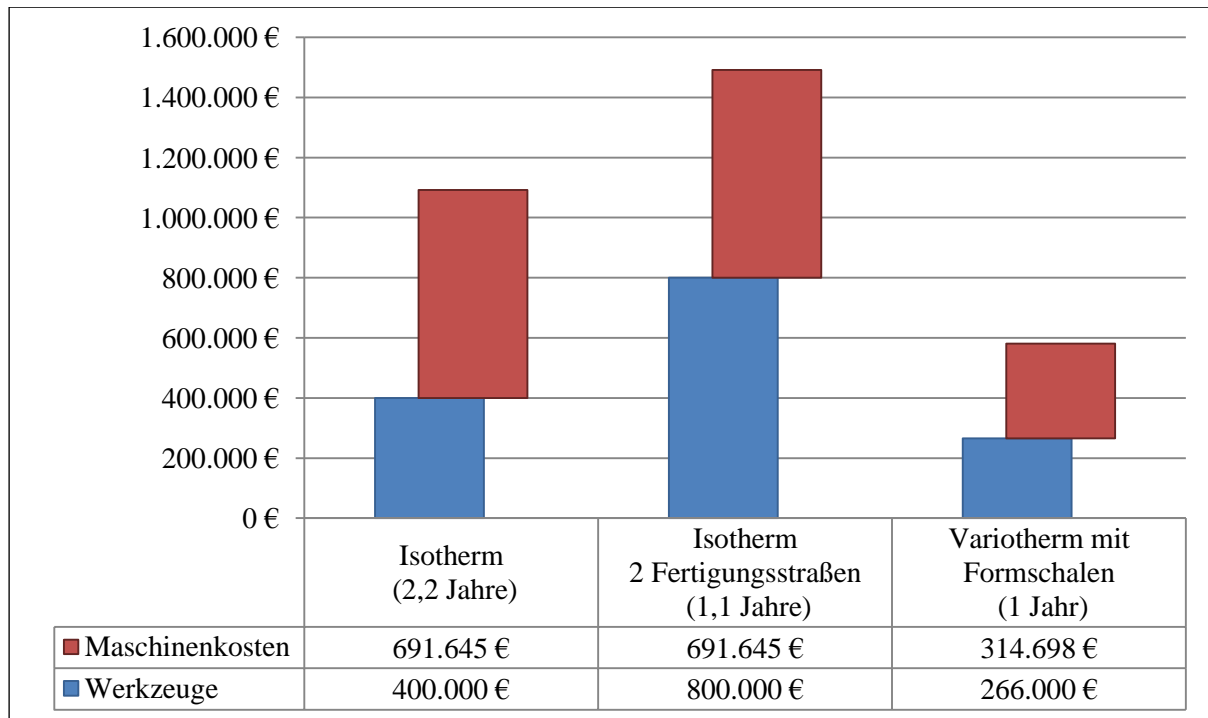


Abbildung 10.3-1: Produktionskostenvergleich verschiedener RTM-Bauteilherstellungsverfahren

Durch die Beschaffungskosten zur Ausrüstung einer zweiten Presse steigen die Produktionskosten zum variothermen Prozess im Verhältnis zur Produktion mit nur einer Presse um 400.000 €. Die anfallenden Maschinenkosten bleiben hiervon jedoch unberührt, da die absolute Zeit, die alle Bauteile in den Maschinen verbringen, gleich bleibt.

Folgende Gesamtkosten entstehen für den reinen Betrieb:

**Isothermer Prozess (39.500 Stück in 2,2 Jahren):**

➔ 1.091.645 € (ohne die Investitionen für eine Presse)

**Isothermer Prozess mit 2 Fertigungsstraßen (39.500 Stück in 1,1 Jahren):**

➔ 1.491.645 € (ohne die Investitionen für zwei Pressen)

**Variothermer Prozess (39.500 Stück in 1 Jahr):**

➔ 580.698 € (ohne die Investitionen für eine Presse)

Aus den Ergebnissen ist zu schließen, dass bei einem Output von 39.500 Teilen bei einem variothermen Prozess gegenüber dem herkömmlichen isothermen Prozess die Kosten um 47 % sinken. Soll der Output in gleicher Zeit hergestellt werden, so steigt die Kostenersparnis beim variothermen Prozess gegenüber dem isothermen Prozess sogar auf 61,1 %. Nicht zu vergessen sind die gegebenenfalls anfallenden Beschaffungskosten für neue RTM-Pressen, falls diese noch nicht vorhanden sind. Für die Produktion der 39.500 Bauteile innerhalb von einem Jahr (1,1 Jahre) werden für den isothermen Prozess zwei Pressen im Wert von jeweils ca. 1,6 Mio. € benötigt. Für die variotherme Produktion innerhalb von einem Jahr (1,0 Jahre) wird für die gleiche Produktionszahl nur eine Presse benötigt. Diese Presse könnte – aufgrund der verbesserten Bedingungen für die Harzinjektion durch niedrigere Viskosität mittels angepasster Temperatur im Werkzeug (vgl. Kapitel 9.2 *Variotherme Prozessführung*) – zudem mit niedrigerer Tonnage ausgeführt werden. Demzufolge wären die entsprechenden Investitionen für diese Presse dann sogar kleiner als bei der herkömmlichen isothermen Variante mittels definierter Spaltinjektion; somit wäre das Einsparpotenzial dann noch höher.

## 11 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Thematik der Direktbestromung von Kohlenstofffasern zur Minimierung von Zykluszeit und Energieaufwand bei der Herstellung von Karbonbauteilen. In diesem Kapitel sollen die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf eine sinnvolle weitergehende Forschung gegeben werden.

### 11.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich mit dem Einsatz eines auf direkter Stromeinleitung in das Kohlenstofffaserhalbzeug basierenden Konzeptes deutliche Vorteile gegenüber derzeitigen Erwärmungsvarianten aus dem Stand der Technik ergeben. Mit der Umsetzung dieses Verfahrens kann die Erzeugung eines CFK-Preforms gegenüber herkömmlichen Herstellungsverfahren signifikant beschleunigt und gleichzeitig die dafür benötigte Energie reduziert werden. Da lediglich das Halbzeug erwärmt wird, ist die aufzuheizende Masse gering und die Aufheizraten können entsprechend hoch eingestellt werden, ohne dass die dazu notwendige Energie überproportional ansteigt. Durch die kürzeren Erwärmungszeiten fallen entstehende Verlustleistungen über die resultierende Abstrahl- und Wärmeübertragungszeit kleiner aus. Die schnelle und homogene Erwärmung des Halbzeuges wird durch die Stromeinleitung in ein mehrlagiges Faserhalbzeug dadurch begünstigt, dass auch die inneren Lagen mit Strom durchflossen werden. Die Erwärmung des Halbzeuges erfolgt demnach nicht nur von außen – wie bei der Verwendung von Kontakt- oder IR-Heizelementen – sondern auch von innen heraus. Eine quasi berührungslose, energetisch effektive und selektive sowie volumetrische Erhitzung der Kohlenstofffaserhalbzeuge ist demnach möglich und wurde in praktischen Versuchen validiert.

Die homogene Erwärmung von Hohlstrukturen mithilfe von direkter Stromeinleitung in die Faserhalbzeuge wurde anhand von entsprechenden Versuchsaufbauten nachgewiesen. Ferner konnte eine Abhängigkeit der Stromstärke zum Durchleitungsgrad in Tiefenrichtung des Kohlenstofffaserhalbzeuges aufgedeckt werden. Infolgedessen kann durch die Erhöhung der eingeleiteten Stromstärke der innen liegende Bereich des betreffenden Halbzeuges homogener und schneller erwärmt werden. Demgemäß ist der von der Halbzeugart abhängige Temperaturgradient über den Laminatquerschnitt wesentlich geringer als bei Erwärmungsmechanismen mittels Konvektion oder Wärmestrahlung. Gegenüber herkömmlichen und speziell auf Induktion basierenden Varianten ist die zur Erwärmung notwendige Apparatur wesentlich kleiner, nach oben und unten freigängig, und es können große Flächen sowie dickere Laminataufbauten homogen aufgeheizt werden. Mit dem ergänzend dazu vorgestellten Fertigungskonzept wird der ther-

moplastische Binder durch die Fasern des Preformzuschnittes schon während des Transportprozesses im Endeffektor durch die integrierten Klemmelektroden für den nachfolgenden Umformprozess aufgeheizt. Betreffend der aufzuheizenden Halbzeuggröße ist das System – aufgrund seines Funktionsprinzips durch Stromeinleitung an mehreren definierten Stellen in den Kohlefaserzuschnitten – sehr flexibel. Ferner konnte durch die entwickelte Stromeinleitungssteuerung gezeigt werden, dass selbst asymmetrische Zuschnittgeometrien oder in der Lagendicke variierende Halbzeuge (z. B. lokale Verstärkungslagen) sehr homogen, äußerst energieeffizient und zugleich deutlich schneller erwärmt werden können, als es mit derzeit bekannten Verfahren möglich ist. Ergänzend dazu können Defizite, die durch Verschnittoptimierungen oder durch eine komplexe nachfolgende Umformung zu einer eingeschränkte Lage und Anzahl der Kontaktelektroden führen, durch angepasste Bestromungsmuster ausgeglichen werden.

Das ausgearbeitete Erwärmungskonzept erlaubt durch seine offene Bauweise sowie durch die einfachen und kleinbauenden Bestandteile eine problemlose Implementierung in bestehende CF verarbeitende Anlagen. Lediglich Kupferelektroden müssen in Kontakt mit dem zu erwärmenden Halbzeug gebracht werden, während die für die Erzeugung und Dosierung der Wärme notwendige Energie stationär außerhalb eines sich bewegenden Systems über Stromkabel verbunden, jedoch nicht mitgeführt werden muss. Über die zur Stromeinleitung in das Faserhalbzeug applizierten Elektroden können die elektrischen Widerstandswerte gemessen werden, die Rückschlüsse auf den ergriffenen Lagenaufbau und dessen Zustand geben. Es ist denkbar, diese Informationen zur Qualitätskontrolle und Prozesssteuerung in der CFK-Bauteilfertigung zu nutzen.

Die Stromeinleitung über einen entwickelten Endeffektor in Organobleche hat gezeigt, dass sich mit thermoplastischer Matrix behaftete Kohlenstofffasern auch über höhere Temperaturen von über 460 °C hinweg schnell und homogen erwärmen lassen. Das Aufheizen der thermoplastischen Matrix erfolgt gegenüber der herkömmlichen IR-Heizvariante auch in tieferen Schichten, sodass ein Überhitzen der Oberflächen infolge von Zykluszeitreduktionsmaßnahmen nicht bzw. erst viel später einsetzt. Demzufolge können besonders dicke Bauteile oder mit lokalen Verstärkungslagen versetzte Bauteile in kürzerer Zeit homogener erwärmt werden. Ein zuvor befürchtetes Aufschmelzen und Verkleben der Kontaktelektroden mit dem ergriffenen Organoblech konnte aufgrund der hohen Aufheizraten nicht registriert werden.

Ferner konnte gezeigt werden, dass die detektierbaren Werte der eingeleiteten Stromstärke und Spannung Aufschlüsse über den Erwärmungs- und Erweichungsgrad der Thermoplasthalbzeuge geben und somit den idealen Startpunkt einer Umformung, ohne zusätzliche Sensoren, erkennen lassen. Zudem erfolgt die Temperaturregelung aufgrund des schnellen Ansprechverhaltens der direkten Stromeinleitung praktisch ohne erkennbare Verzögerung. Störungen in der Fertigungslinie, die in nachfolgenden Prozessschritten auftreten und zu Taktzeitverschiebungen führen, können so kompensiert werden. Die Erwärmung von unidirektionalen Kohlenstofffasern, die in einer PA 66-



Thermoplastmatrix eingebettet sind, konnten durch einen quer zur Dickenrichtung wechselseitig eingeleiteten Strom homogen erwärmt werden. Durch die Integration des Bestromungssystems mit der konzipierten und vorgestellten Endeffektorkinematik können die Transportwege zur Aufheizung genutzt und es kann somit Zykluszeit eingespart werden. Außerdem ist dadurch das Temperaturniveau im Halbzeug, besonders bei sehr dünnen Organoblechen, wesentlich geringer, da Abkühlvorgänge durch zusätzlich anfallende Transportwege nicht mehr durch dessen Überhitzen vorgehalten werden müssen.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Erzeugung eines Serien-CFK-Bauteils durch die Anwendung von thermisch isolierten Injektionsformschalen – in Kombination mit dem Direktbestromungsprinzip zur Nutzung des innen liegenden Preforms als Widerstandsheizung – gegenüber herkömmlichen Herstellungsverfahren signifikant optimiert werden kann. Versuche anhand einer Hohlkörperstruktur haben gezeigt, dass durch die Bestromung des Faserhalbzeugs über die integrierten Kupferelektroden eine schnellere Erwärmung möglich ist. Durch eine Umstellung eines herkömmlichen Fertigungskonzeptes auf eine derartige Erwärmungsstrategie kann eine Reduzierung des notwendigen Energieverbrauches von  $> 99\%$  erreicht werden. Es wird also nur noch weniger als  $1\%$  an Strom verbraucht. Dies ist möglich, da nur der Preform temperiert wird und die Isolierung direkt an der Bauteilkontur anliegt. Als erste wirtschaftliche Variante bietet diese Anwendung von Injektionsformschalen mit Direktbestromung die Möglichkeit, variotherme Zyklen zu fahren. Dies kann zu einer massiven Verkürzung der Injektions- und Härtezeiten bei der Composite-Bauteilfertigung führen.

Mit einem Formschalenproduktionswerkzeug können preisgünstig flexible Formschalen mit integrierten Stromeinleitungspunkten hergestellt werden, wenn diese abgenutzt oder beschädigt sind. Zudem können Bauteilgeometrieänderungen schneller und kostengünstiger durchgeführt werden, weil das Formschalenproduktionswerkzeug aufgrund der niedrigeren Anforderungen weniger komplex aufgebaut ist als ein RTM-Werkzeug für eine Großserie. Eine Variantenvielfalt durch angepasste Formschalen mit identischer Außenform und differierenden Innenkontur ist somit schnell realisierbar und mit weniger Kosten verbunden. Durch die elastisch ausgestalteten Formschalen ist zudem weniger bis kein Einsatz von Trennmittel zur Entformung der Bauteile nötig. Bei der Verwendung mehrerer Formschalen kann jeweils ein Paar außerhalb des Injektions- und Aushärteprozesses entformt, gereinigt und mit einem neuen Preform bestückt werden. Dies führt zu einer weiteren Reduzierung der Pressenbelegzeit. Außerdem können Vorheizschritte und eventuelle Nachtemperzyklen außerhalb der Presse in den kontaktierten Formschalen erfolgen. Da die Formschalen sehr leicht zu handhaben sind, ist ein Transfer von einer Fertigungsstraße zur nächsten bei Störungen oder Fertigungsengpässen mit Hilfe von adaptiven Formschalenaufnahmen sehr leicht möglich. Mittels Direktbestromung der Kohlenstofffasern können somit für viele Herstellverfahren gleichzeitig

die benötigten Zeiten und Kosten zur Bauteilgenerierung gesenkt sowie deren Qualität gesteigert werden.

## 11.2 Ausblick

Die theoretischen Betrachtungen in Kombination mit den durchgeführten praktischen Versuchen belegen das immense Einsparungspotenzial bzgl. Energie und Zykluszeit. Eine zeitnahe Implementierung dieser Fertigungstechnik in die Produktion von CFK-Bauteilen ist somit im besonderen Maße zu befürworten. Die wesentlichen Einflussgrößen für eine optimale Aufheizung von Kohlenstofffaserhalbzeugen wurden identifiziert und in einer entsprechenden Gleichung zusammengefasst. Eine Integration des Erwärmungskonzeptes in die Fertigung von CFK-Serienbauteilen sollte jetzt keine größeren Schwierigkeiten mehr bereiten.

Ergänzende Untersuchungen zur weiteren Potenzialausschöpfung dieses Fertigungsansatzes wären beispielsweise die Durchführung von Versuchen mit dem Ziel des praktischen Nachweises zur definierten Beeinflussung des Harzflusses über ein angepasstes Bestromungsmuster. Diese könnte mit einer Erweiterung der gezeigten Steuerung zur gezielten und dosierten Stromeinleitung durch eine entsprechend angepasste Programmierung erreicht werden. Die notwendigen Parameter für die Bestromung in Bezug auf die Viskositätseigenschaften des Harzmaterials müssten diesbezüglich im Vorfeld ermittelt werden. Durch die Stromeinleitung in das Halbzeug kann über die applizierten Elektroden je Zeitintervall der jeweilige Widerstandswert – wie bereits dargestellt wurde – ermittelt werden. Weiterführende Versuche könnten dessen Auswertung, neben der gezeigten Bestimmung des Erweichungszustandes der Matrix bei Organoblechen, zur Analyse des aktuellen Zustandes der Kohlenstofffasern nutzen. Damit wäre es theoretisch möglich, qualitätsrelevante Informationen bzgl. der Faserdehnung bis hin zur Faserschädigung bei deren Umformung sowie der Fasertemperatur ohne zusätzliche Sensoren zu erlangen.

Versuche mit elektrisch leitenden Matrices wurden noch nicht durchgeführt, könnten jedoch einen ähnlich positiven Effekt auf die Energieeffizienz sowie Zykluszeitreduktion haben. Des Weiteren wäre eine Übertragung des Konzeptes zur direkten Stromeinleitung zwecks Erwärmung des entstehenden Bauteils in einen VAP-Prozess sinnvoll. Hiermit könnten großvolumige CFK-Strukturen, wie sie beispielsweise derzeit in der Luftfahrt gefertigt werden, energieeffizient, homogen und schnell ausgehärtet werden. Zur elektrischen Isolation von metallischen LKVs könnten diese beispielsweise mittels einer einseitigen GFK-Formschale oder einer entsprechenden Trennfolie (z. B. Folie Flexplast IFAM Bremen) vor der CF-Faserablage belegt werden.

Ein weiterer Ansatz zur effektiven Nutzung der elektrischen Leitfähigkeit von bebinderten Kohlenstofffaserhalbzeugen zwecks direkter Erwärmung durch den eingeleiteten elektrischen Strom ist die Handhabung und Fixierung. Eine Handhabungseinheit muss hierzu mit diversen Elektroden ausgestattet werden, die bei einer Berührung mit einem bebinderten Kohlenstofffaserhalbzeug eine direkte Stromeinleitung an einer oder mehreren definierten Stellen erzeugen. Das Kohlenstofffaserhalbzeug fungiert so selbst als Widerstandsheizung und erwärmt sich und damit den applizierten Binder in weniger als 0,5 s. Die Kohlenstofffaserlagen kleben infolgedessen direkt an einer Haftfläche (z. B. Vlies) vom Handhabungssystem oder an einer zuvor aufgenommenen Faserlage. Da der elektrische Widerstand quer zur Kohlenstofffaserrichtung höher als längs dazu ist, kann durch Einstellen der jeweiligen Stromstärke die Erwärmung in Tiefenrichtung beeinflusst werden. Dies kann zur Separation von Einzellagen eines bereitgestellten Kohlenstofffaserstapels sowie zur zeitgleichen Ergreifung oder Fixierung von mehreren Lagen genutzt werden.

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] C.-S. Ernst, L. Eckstein und I. Olschewski: *CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotentiale bei PKW's bis 2020*, Abschlussbericht 113510, Aachen, S. 10-16, (2012).
- [2] Europäischen Union: *Verordnung (EU) Nr. 333/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer Personenkraftwagen*, Amtsblatt der Europäischen Union, (04.2014).
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Entwicklung von Energiepreisen und Preisindizes zu normalen Preisen in Deutschland*, Energiedaten Tabelle 26, (01.2016).
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Energieforschung in Deutschland*, Energiedaten Tabelle 43, (10.2015).
- [5] Manfred Neitzel, Peter Mitschang und Ulf Breuer: *Handbuch Verbundwerkstoffe, Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, S. 255-256, S. 301-321, S. 365-407, (07.2014), ISBN: 978-3-446-43696-1.
- [6] Bernhard Jahn: *Composites-Marktbericht 2013; Marktentwicklung, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*, Carbon Composites, AVK, S. 28, (09.2013).
- [7] Ralph Lässig, Martin Eisenhut, Arne Mathias, Rolf T. Schulte, Frank Peters, Thorsten Kühmann, Thomas Waldmann und Walter Begemann: *Studie Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen, Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*; VDMA, Roland Berger Strategy Consultants, S. 16, S. 27, (09.2012).
- [8] Michael Trzesniowski: *Rennwagentechnik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme*, 4. Auflage Springer-Vieweg-Verlag, S. 50-52, S. 438-461, (2014), ISBN: 3-658-04919-7.
- [9] Walter Dunkmann, Stefan Bauer und Alexander Hemmen: *Greifvorrichtung*, Schutzrecht EP 2 926 956 A1 Priorität: 01.04.2014 DE 10 2014 206 193, J. Schmalz GmbH.
- [10] Hilmar Apmann, Thorsten Flessner, Alexander Hemmen und Manuel Herkt: *Automated handling of dry carbon and prepreg materials for the serial production for the aeronautic and automotive industry*, Premium AEROTEC GmbH, Paper Airtec 5th International Conference "Supply on the wings", (11.2010).

- [11] Axel Herrmann: *Automatisierung bleibt Schlüsselthema bei der CFK-Fertigung*, Artikel K-Zeitung online, 6. CFK Valley Stade Convention, (06.2012).
- [12] Manfred Flemming, Gerhard Ziegmann und Siegfried Roth: *Faserverbundbauweisen Fasern und Matrices*; Springer-Verlag Berlin, S. 3-31, S. 183-185, (04.1995), ISBN: 3-540-58645-8.
- [13] M. Kupke, K. Schulte und R. Schüler: *Non-destructive testing of FRP by d.c. and a.c. electrical methods*, Composite Science and Technology, Volume 61, Issue 6, S. 837-847, (05.2001).
- [14] T. Prasse, F. Michel, G. Mook, K. Schulte und W. Bauhofer: *Comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates*, Composite Science and Technology, Volume 61, Issue 6, S. 831-835, (05.2001).
- [15] Rüdiger Schüler, Shiv P. Joshi und Karl Schulte: *Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping*, Composite Science and Technology, Volume 61, Issue 6, S. 921-930, (05.2001).
- [16] Michael Kupke: *Entwicklung elektrisch leitfähiger Glasfaserverbundwerkstoffe mittels Kohlenstoff-Nanopartikel*, Dissertation, Universität Hamburg-Harburg, Cuvillier Verlag Göttingen, S. 29-38, (2001), ISBN: 3-898-73165-0.
- [17] Thomas Müller, Dietmar Drummer, Christoph Linn und Leo Hoffmann: *Ein energieeffizientes Verfahren für den Leichtbau*, Artikel Kunststoffe, Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT), Fürth GmbH, Carl Hanser Verlag München, (06.2012).
- [18] Michael Klemt, Birgit Binjung, Simon Geier und Christian Bonten: *In-situ-Aufheizung von CFK-Organoblechen*, Artikel Kunststoffe, Institut für Kunststofftechnik (IKT), Carl Hanser Verlag München, (11.2011).
- [19] Erhard Hornbogen, Gunther Eggeler und Ewald Werner: *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*, 10. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 362-390, (2012), ISBN: 978-3-642-22560-4.
- [20] Hans-Hermann Braess und Ulrich Seiffert: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch, 7. Auflage, Springer-Vieweg-Verlag, S. 527-529, (01.2013), ISBN: 978-3-658-01691-3.
- [21] Horst E. Friedrich: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, Institut für Fahrzeugkonzepte, DLR Stuttgart, Springer-Vieweg-Verlag, S. 502-515, (2013), ISBN: 978-3-834-82110-2.

- [22] Andreas Schnabel, Christoph Greb und Thomas Gries: *Innovative Preformingverfahren: Kombination ein- und mehrstufiger Preformprozesse*, Abschlusskolloquium der Forschergruppe 860, ITA RWTH Aachen, (11.2012).
- [23] Jia-Yang Du, Jan Wessels, Hilmar Apmann, Alexander Hemmen und Werner Tjarks: *Verfahren zum Zusammenfügen von zwei oder mehr Einzellagen aus Faserstrukturen zu einem Stapel*, Schutzrecht DE 10 2014 213 475 A1 2016.01.14, Bayerische Motoren Werke AG.
- [24] Pierre Zahlen: *Beitrag zur kostengünstigen industriellen Fertigung von haupttragenden CFK-Großkomponenten der kommerziellen Luftfahrt mittels Kernverbundbauweise in Harzinfusionstechnologie*, Science-Report aus dem Faserinstitut Bremen, Prof. Dr.-Ing. Axel S. Herrmann, Verlag Berlin GmbH, S. 7-12, (2013).
- [25] Wolfgang Beitz und Karl-Heinrich Grote: *DUBBEL; Taschenbuch für den Maschinenbau*, 19. Auflage, Springer-Verlag, S. F21, (1997), ISBN: 978-3-662-11575-6.
- [26] Gerhard Stelzer: *Zum Faser- und Eigenschaftsabbau bei Verarbeitung und Recycling diskontinuierlich faserverstärkter Kunststoffe*, Dissertation, Universität Kaiserslautern, S. 7-11, (12.2002).
- [27] Ralf Knoche: *The Response of C/SiC Ceramic Matrix Composites exposed to severe thermo mechanical load conditions for hot structures and thermal protection systems in reusable launch vehicles*, Dissertation, Universität Bremen, S. 30-38, (2010).
- [28] Heinrich W. Bergmann: *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 109-112, S. 116-119, (1992), ISBN: 3-540-54628-6.
- [29] Helmut Schürmann: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, TU Darmstadt, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 41-42, S. 60-63, S. 114-116, (2007), ISBN: 978-3-540-72189-5.
- [30] Chokri Cherif: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau, Techniken - Verfahren – Materialien - Eigenschaften*, Technische Universität Dresden, Springer-Verlag, S. 102-104, S. 292-298, (2011), ISBN: 978-3-642-17991-4.
- [31] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe, Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*, 3., vollständig überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, S. 375-392, (2010), ISBN: 978-3-834-80881-3.



- [32] Hans-Peter Zepf: *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix: Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung*, expert Verlag, S. 107-111, (1997), ISBN: 978-3-816-91390-0.
- [33] F. Fourné: *Synthetische Fasern: Herstellung, Maschinen und Apparate, Eigenschaften*; Handbuch für Anlagenplanung, Maschinenkonstruktion und Betrieb, Carl Hanser Verlag München (03.1995), ISBN: 978-3-446-16058-3.
- [34] Materialdatenblatt: *PEEK, Materialeigenschaften nach DIN EN ISO 10350*, POLYTRON Kunststofftechnik GmbH & Co. KG (2012).
- [35] Airbus Process Instruction: *Manufacturing of monolithic parts with thermoplastic material*, AIPI 03.02.020 (11.2007).
- [36] Ticona Engineering Polymers: *FORTRON 0203/PPS/Unfilled*, Material Data Sheet (01.2007).
- [37] Walter Hellerich, Günther Harsch und Erwin Baur: *Werkstoff-Führer Kunststoffe, Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*, 10. Auflage, Carl Hanser Verlag München, S. 181-200, (10.2010), ISBN: 978-3-446-42436-4.
- [38] Product Data: *HexFlow® RTM 6, 180 °C epoxy system for Resin Transfer Moulding monocomponent system*, Hexcel Corporation, Publication ITA 065e (07.2009).
- [39] Walter Michaeli: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, Carl Hanser Verlag München, S. 158-161, (09.2010), ISBN: 978-3-446-42488-3.
- [40] Hilmar Apmann, Alexander Hemmen und Manuel Herkt: *Automatic Handling of Carbon Fiber Preforms for CFRP Parts in Aerospace*, SAE 2012 Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Technical Paper 2012-01-1864, Premium AEROTEC GmbH, (09.2012).
- [41] Hauke Lengsfeld, Felipe Wolff-Fabris, Johannes Krämer, Javier Lacalle und Volker Altstädt: *Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, S. 15-17, S. 140-148, S. 155-161, (2015), ISBN: 978-3-446-43300-7.
- [42] Manfred Flemming, Gerhard Ziegmann und Siegfried Roth: *Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 58-106, S. 209-239, (1999), ISBN: 3-540-61659-4.
- [43] Hartmut Krohn, Werner Pönitzsch, Siegfried Roth, Carlo Sigolotto und Wolfgang Unger: *Verfahren zum Herstellen von Faserverbund-Bauteilen*, Schutzrecht DE 41 39 523 C2, Dornier Luftfahrt GmbH (09.1995).
- [44] Josef Kraus: *Industrielle Composite-Fertigung erhält klarere Konturen*, Bericht JEC Europe 2013, MM MaschinenMarkt, Vogel Business Media (02.2013).

- [45] Markus Wölflé: *Die A350 XWB wächst, Produktionsbeginn für die verlängerte Version*, Artikel, Premium AEROTEC GmbH, HORIZONTE Nr. 15, (2014).
- [46] Andreas Hänsch: *VAP® Vacuum Assisted Process*, Trans-Textil GmbH (2011).
- [47] Jürgen Filsinger, Torsten Lorenz, Franz Stadler und Stefan Utecht: *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen mittels eines Injektionsverfahrens*, Schutzrecht WO 01/68353 (09.2001).
- [48] Stefan Utecht: *Infusionstechnik: Technischer Stand und Serienanwendung der VAP*, Präsentation, COMPOSYST GmbH, Carbon Composites (07.2010).
- [49] Manfred Knappe: *Preiswerter, schneller, leichter: JEC Innovation Award 2009 für Premium AEROTEC*, Presseinformation, Premium AEROTEC GmbH (03.2009).
- [50] Raphael Reinhold: *Composite Preforming Cell: Innovative Automatisierungslösungen zur Composite-Serienfertigung*, Lightweight Design Vol. 6, S. 14-15, (06.2013).
- [51] Wolfgang Siebenpfeiffer: *Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe – Fertigung - Konzepte*, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer-Vieweg Verlag, S. 4-27, S. 44-49, S. 64-75, (12.2013), ISBN: 978-3-658-04024-6.
- [52] Christian Bonten: *Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen*, Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik (IKT) Carl Hanser Verlag München, S. 318-320, (07.2014), ISBN: 978-3-446-44093-7.
- [53] W. Michaeli, K. Fischer, D. Lippe, F. Meyer, J. Wessels, und L. Winkelmann: *New Process technology for continuous fibre-reinforced composites*, Tagungsunterlagen, SAMPE '09 Europe Conference, Paris, Frankreich, S. 23-25, (03.2009).
- [54] Veronique Carlier, Andre Bertin und Mikhael Vandeuren: *Method and apparatus for moulding parts made from Composite materials*, US Patent Application Publication, US2013/0234353A1 (09.2013).
- [55] Robert Bastian: *Fertigung von CFK-Motorhauben in wenigen Minuten*, Artikel, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) RWTH Aachen, Lightweight Design, Volume 5, Issue 6 (2012).
- [56] Michael Schillinger: *Vorrichtung zum Beschneiden von Faserverbund-Werkstücken*, Schutzrecht DE 10 2011 078 911 A1 2013.01.17, Bayerische Motoren Werke AG.
- [57] Frank Weiland: *Ultraschall-Preformmontage zur Herstellung von CFK-Luftfahrtstrukturen*, Dissertation, Institut für Verbundwerkstoffe (2013).

- [58] Bernd Thoma, Kay A. Weidenmann und Frank Henning: *Chemical Stitching, ein vielversprechender Ansatz für die automatisierte Preformfertigung*, Artikel, Kunststofftechnik 8, Carl Hanser Verlag, (08.2012).
- [59] Sandra Semmler, Thomas Michel, Thomas Wimmer, Roland Lang, Norbert Donath und Doris Prieller-Bruck: *Verfahren zum Verbinden mindestens zweier Dünnbleche*, Schutzrecht DE 10 2004 016 854 A1 2005 10 27, Bayerische Motoren Werke AG.
- [60] Frank Weiland, Stefan Gubernatis, Uwe Beier und Christian Weimer: *Ultrasonic welding device with a pick member and/or a press pad, and method of operating said device*, Schutzrecht EP 2 647 463 A1, Eurocopter Deutschland GmbH (04.2012).
- [61] Jochen Mitzler, Josef Renkl und Martin Würtele: *Hoch beanspruchte Strukturbauteile in Serie*, Artikel, KraussMaffei Technologies GmbH, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, (03.2011).
- [62] Gustav Brunner, Alexander Hemmen und Jochen Scholler: *Metallische Dichtungen für druckbeaufschlagte Werkzeuge*, Schutzrecht DE 10 2015 001 315.7, Premium AEROTEC GmbH.
- [63] Zhao Nuoping: *Nähen als Montageverfahren textiler Preforms und Wirkungen der Nähte auf lokale mechanische Eigenschaften thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe*, Dissertation, Technische Universität Dresden, (12.2008).
- [64] Alexander Hemmen, Michael Loof, Andreas Krail und Oliver Thiel: *Verfahren zur Herstellung eines Verbundpressteils*, Schutzrecht DE 10 2015 001 314.9, Premium AEROTEC GmbH.
- [65] Alexander Hemmen: *Ansätze einer automatisierten Fertigung von CFK-Teilen für die Luft- und Automobilindustrie*, Präsentation, Premium AEROTEC GmbH, Norddeutsche Produktionstage 2013 CFK Valley in Stade, (04.2013).
- [66] Nicolas Gogibus und Peter Waldmeier: *Epoxid Systeme für RTM*, Präsentation, Huntsman Advanced Materials GmbH, AVK Aufbau Seminar Epoxid RTM Systeme, Standard und Hochdruck RTM, (06.2012).
- [67] M. Henningsen, P. Desbois und B. Neuhaus: *Innovative Matrixsysteme für schnelle RTM-Prozesse*, Präsentation, BASF, CCeV Automotive Forum, (06.2011).
- [68] Christos Karatzias: *Großserientaugliche Flüssigimprägnierverfahren zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Strukturbauteilen*, Präsentation, IVK RWTH Aachen, RTM-Aufbauseminar Frankfurt, (06.2013).

- [69] Klaus Drechsler: *CFK-Technologie im Automobilbau: Was man von anderen Märkten lernen kann*, Präsentation, TU München, C.C.e.V. Automotive Symposium Neckarsulm, (06.2010).
- [70] Peter Mitschang und Karsten Grebel: *Zykluszeitverkürzung bei der Verarbeitung von FKV durch den Einsatz variothermer Werkzeuge*; Präsentation, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Fachtagung Carbon Composites, (11.2012).
- [71] John Philip Beaumont: *Auslegung von Anguss und Angusskanal: Spritzgießwerkzeuge erfolgreich einsetzen*, Carl Hanser Verlag München, S. 288-296, (2012), ISBN: 978-3-446-42759-4.
- [72] T. Zimmermann und W. Schinköthe: *Variotherm, aber trotzdem schnell*, Artikel, Plastverarbeiter (07.2011).
- [73] Josef-Martin Kraus: *Start der CFK-Bauteilserienfertigung für das BMW-Elektroauto i3*, Artikel, Elektromobilität, MM MaschinenMarkt, Vogel Business Media, (03.2012).
- [74] U. P. Breuer: *Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste*; Forschungsbericht VDI-2/433, VDI-Verlag, Düsseldorf (1997).
- [75] Heinrich Krahn, Dieter Eh und Harald Vogel: *1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen*, Carl Hanser Verlag, S. 7-8, (10.2008), ISBN: 978-3-446-41243-9.
- [76] J. Dietrich, Christoph Schütze und Marcus Richter: *Entwicklung einer neuen Prozesskette für die Herstellung von Schienenfahrzeugteilen aus Verbundwerkstoffen*, Präsentation, 2. Tag der Forschung an der HTW Dresden, (10.2011).
- [77] Michael Hanke, Lars Herbeck und Holger Franken: *Beheizbares Formwerkzeug für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundstoffen*, Schutzrecht DE 10 2004 042 422 A1 2006.03.23, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- [78] Herbert Funke und Jens Brandes: *Elektrisch beheizbares Formwerkzeug in Kunststoffbauweise*, Schutzrecht DE 10 2006 058 198 B4 2013.04.18, fibretemp GmbH & Co. KG.
- [79] Dietrich P. Jonke: *Ein innovativer Ansatz zur Fertigung großer Formen für die kunststoffverarbeitende Industrie*, Ergebnisse des BMBF Forschungsprojekts "Sprayforming", 6. MATERIALICA Surface Kongress (10.2012).
- [80] Elstein-Werk M. Steinmetz GmbH & Co. KG: Produktkatalog: *Keramische Infrarotstrahler*, Hauptkatalog 2014 deutsch (08.2014).
- [81] Horst Czichos und Manfred Hennecke: *Hütte: Das Ingenieurwissen*, Akademischer Verein Hütte e.V., Berlin 32. aktualisierte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. B206-B218, (2004) ISBN: 3-540-20325-7.

- [82] Lambert Feher: *Neue Energieeffiziente Hochfrequenztechnologien für die industrielle Produktion von CFK-Strukturen im Verkehrswesen*, Präsentation, KIT, Workshop “Energieeffiziente Mikrowellen-Produktionssysteme für Luftfahrt und Automobil-Leichtbau“, (06.2010).
- [83] Axel Herrmann: *Neue Technologien für die automatisierte RTM-Fertigung*, Abschlussbericht, CTC GmbH (2006).
- [84] M. Podkorytov: *Technologie des Mikrowellenautoklaven*, Präsentation, DLR, 4. DLR-FA Wissenschaftstag Produktionstechnik für den CFK-Rumpf, (10.2007).
- [85] Andreas Flach, Lambert Feher, Volker Nuss und Thomas Seitz: *Mikrowellenresonator, eine aus einem solchen Mikrowellenresonator modular aufgebaute Prozessstraße, ein Verfahren zum Betreiben und nach diesem Verfahren thermisch prozessierte Gegenstände/Werkstücke mittels Mikrowelle*, Schutzrecht DE 103 29 411 B4 2006.01.19, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- [86] Matthias Meyer, Burkhard Binder und Martin Graeber: *Mikrowellenautoklav*, Schutzrecht DE 10 2005 050 528 B4 2007.07.26, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V..
- [87] Christian Obermann, Marco Wacker, Markus Flatin, Thomas Kugler und Lars Moser: *Wirtschaftliches Fügen von Faser-Kunststoff-Verbundstrukturen mittels induktiver Erwärmung unter Einsatz flexibler Handhabungssysteme, (Induflex)*, Abschlusspräsentation, Induflex (05.2009).
- [88] Johannes Rybach: *Physik für Bachelors*, 3., aktualisierte Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, S. 145-147, (02.2013), ISBN: 978-3-446-43529-2.
- [89] Wilhelm Hille und Otto Schneider: *Fachkunde für Elektroberufe*, 7. überarbeitete Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, S. 76-78, (1983), ISBN: 978-3-519-46800-4.
- [90] T. Ströhlein: *Volumetrische Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Forschungsbericht (2012).
- [91] Christian Hopmann: *Aushärtung per Induktion*, RWTH Aachen, Artikel, Plasterverarbeiter (04.2014).
- [92] T. Zimmermann: *Entwicklung einer induktiven Heizpatrone*, Infoposter Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, (03.2011).
- [93] Eckhard Reese: *Verfahren zum Herstellen eines Strukturbauteils, insbesondere eines Muldenteils, für einen Kraftwagen sowie Verbundbauteil für einen Kraftwagen*, Schutzrecht DE 10 2010 054 195 A1 2012.06.14, Daimler AG.

- [94] Bernd Wohlmann: *Kohlenstoff-Fasern; Eigenschaften, Anwendungen und Herstellung*; Präsentation, Toho Tenax Europe GmbH, (09.2007).
- [95] A. R. Bunsell: *Fibre Reinforcements for Composite Materials*; Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V., S. 120, (1988).
- [96] Simon Christopher Bennett: *Strength-Structure Relationships in Carbon Fibres*; University of Leeds, Textile Physics Laboratory (08.1976).
- [97] Mitsubishi Rayon: *Pitch based Carbon Fiber DIALEAD and Composites*; Mitsubishi Plastics, I.N.C., <http://www.mpi.co.jp> (06.2012).
- [98] Johannes Rehbein: *Leitfähigkeitsverbesserung an CFK-Laminaten*, Innovationsbericht, DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, (2014).
- [99] Eduard Vinaricky: *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 2-29, (03.2002), ISBN: 3-540-42431-8.
- [100] Walter Kiersch: *Anordnung zum Erzeugen eines elektrischen Stromflusses durch Kohlenstofffasern*, Schutzrecht DE 10 2005 003 371 A1 2006.08.03, Kiersch Composite GmbH.
- [101] Herbert Funke: *Beheizbare CFK-Formwerkzeuge - Funktionsweise*, Seminarunterlagen Innovative Konstruktion und Fertigung von Composite – Bauteilen, Fachhochschule Dortmund, fibretemp GmbH & Co. KG, (03.2011).
- [102] Herbert Funke und Jens Brandes: *Vorrichtung zur elektrischen Kontaktierung elektrisch leitfähiger Lamine aus Kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK-Lamine)*, Schutzrecht WO 2011/050787 A2, Fachhochschule Dortmund.
- [103] K. Gieck: *Technische Formelsammlung*, 32. Ausgabe, Hanser-Verlag, Leipzig (2009).
- [104] F. Brinken: *Untersuchungen zur Wärmeübertragung beim Thermoformen von Thermoplasten*, Dissertation, RWTH Aachen (1979).
- [105] F. Herz: *Wärmeübertragungsapparate 13/14*, Skript, Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik, Kapitel 3.3 (2014).
- [106] National Institute of Standards and Technology, *Wert für Stefan-Boltzmann-Konstanten  $\sigma$* , (10.2014).
- [107] Norbert Elsner, Siegfried Fischer und Jörg Huhn: *Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Band 2: Wärmeübergang*, 8. Auflage, Akademie Verlag, Berlin (1993) ISBN: 978-3-527-40013-3.
- [108] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): *VDI-Wärmeatlas*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. Dbb1-Dbb16 (2006), ISBN: 978-3-540-29646-1.

- [109] Johannes Löwe: *Eine Finite-Elemente-Methode für nicht-isotherme inkompressible Strömungsprobleme*, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, (2011).
- [110] Karen Mehrens: *Analyse des wärmetechnischen Verhaltens von Kohlefasern in Abhängigkeit der Prozessparameter in der CFK-Herstellung*, Bachelorthesis, Premium AEROTEC GmbH, (03.2014).
- [111] Julian Lindenblatt: *Entwicklung und Validierung eines Endeffektors zum energie- und zykluszeitreduzierten Erstellen von Kohlenstofffaserpreformlingen*, Bachelorthesis, Premium AEROTEC GmbH, (06.2013).
- [112] Thomas Porkristl: *Kontaktsysteme in der Automobilbranche*, Artikel, Automobil-Elektronik (04.2008).
- [113] Kunststoff-Technik Kuhn GmbH: *Werkstoffdatenblätter für Hochleistungswerkstoffe PEEK, PPS, PA 66* (10.2014).
- [114] Hartmu Berndt: *ESD-Schutz, Normen, Konzepte und Messtechnik in der Praxis*, 2., neu bearbeitete Auflage, Kontakt & Studium Band 675, expert-Verlag (2009), ISBN: 978-3-816-92942-0.
- [115] Christian Reising: *Entwicklung und Validierung einer Steuerung zum energie- und zykluszeitreduzierten Erstellen von Kohlenstofffaser-Preforms*, Bachelorthesis, Premium AEROTEC GmbH, (08.2013).
- [116] Alexander Hemmen und Dirk Berndt: *Verfahren zum Bereitstellen eines Faservorformlings zur Herstellung eines Faserverbundbauteils, sowie Transporteinrichtung für einen Fasermaterialzuschnitt*, Schutzrecht DE 10 2012 019 915 B4 2016.02.25, Premium AEROTEC GmbH.
- [117] Alexander Hemmen: *Formschale für ein Werkzeug zur Herstellung eines Faserverbundbauteils sowie Verwendung einer derartigen Formschale*, Schutzrecht DE 10 2014 014 743 A1 2016.04.14, Premium AEROTEC GmbH.
- [118] Alexander Hemmen: *Formschale für ein Werkzeug zur Herstellung eines Faserverbundbauteils sowie Verwendung einer derartigen Formschale*, Schutzrecht WO 2016/055040 A1 Priorität: 09.10.2014 DE 10 2014 014 743.6 Premium AEROTEC GmbH.
- [119] K. Schulte, M. Kupke, R. Schüler und S.B. Joshi: *Ermittlung der Schädigung in CFK-Platten durch systematische Aufzeichnung der elektrischen Leitfähigkeit*, Beitrag DGZfP-Jahrestagung: Zerstörungsfreie Materialprüfung (05.2001).



## 13 Anhang

### 13.1 Übersicht der verwendeten Laborgeräte

#### Typ-K-Thermoelement-Drahtfühler

Temperaturbereich	0 °C bis +1100 °C (Dauerbetrieb)
	-180 °C bis +1300 °C (kurzfristig)
Toleranzen	± 1,5 zwischen - 40 °C und 375 °C
	± 0,004 x T zwischen 375 °C und 1.000 °C

#### 10-Kanal-Kompaktschreiber midi LOGGER GL200



Thermoelement K	-200 °C ≤ T ≤ -100 °C ± 0,05 % + 2 °C
	-100 °C ≤ T ≤ 1.370 °C ± 0,05 % + 1 °C

#### Stromzange BENNING CM7



- DC-Spannung 400/1000 V – 0,1/1 V; ± 0,7 % + 2 Digits
- AC-Spannung 400/750 V – 0,1/1 V; ± 1 % + 5 Digits
- Widerstand 400 Ω – 0,1Ω; ± 1 % + 3 Digits
- Frequenz 400 Hz – 1 Hz; 1 % + 2 Digits
- Gleichstrom 200/400/1000 A – 0,1/0,1/1 A ± 2,9 % + 5 A
- Wechselstrom 200/400/1000 A – 0,1/0,1/1 A ± 2,9 % + 5 A

#### Wärmebildkamera FLUKE Ti30



- Temperaturbereich -10 °C bis 250 °C
- Detektortyp 120 x 160 Pixel ungekühlte Bolometermatrix
- Genauigkeit ± 2 % oder ± 2 °C
- Genauigkeit (von -10 bis 0 °C) ± 3 K
- Reproduzierbarkeit ± 1 % oder ± 1 K, der größere Wert gilt
- Temperaturauflösung (NETD) 200 mK
- Auflösung Temperaturanzeige 100 mK

### Milliohmmeter PEAKTECH 2705-2



- Milliohm-Messbereich  $400\text{ m}\Omega/4/40\text{ }\Omega - 0,1\text{ m}\Omega; \pm 1,0\text{ \%} + 5\text{ Digits}$
- max. Teststrom  $200\text{ mA} (400\text{ m}\Omega) / 20\text{ mA} (4\text{ }\Omega) / 2\text{ mA} (40\text{ }\Omega)$
- DC-Spannung  $400\text{ mV}/4/40/400/1000\text{ V} - 0,1\text{ mV}; \pm 1,0\text{ \%} + 5\text{ Digits}$
- AC-Spannung  $400\text{ mV}/4/40/400/1000\text{ V} - 0,1\text{ mV}; \pm 1,2\text{ \%} + 10\text{ Digits}$
- Widerstand  $400\text{ }\Omega/4/40/400\text{ k}\Omega/4/40\text{ M}\Omega - 0,1\Omega; \pm 1,5\text{ \%} + 2\text{ Digits}$
- Kapazität  $4/40/400\text{ nF}/4/40/400\text{ }\mu\text{F}/4/40\text{ mF} - 1\text{ pf}; 3,0\text{ \%} + 10\text{ Digits}$
- Gleichstrom  $400/4000\text{ }\mu\text{A}/40/400\text{ mA} - 0,1\text{ }\mu\text{A}; \pm 1,5\text{ \%} + 5\text{ Digits}$
- Wechselstrom  $400/4000\text{ }\mu\text{A}/40/400\text{ mA} - 0,1\text{ }\mu\text{A}; \pm 1,5\text{ \%} + 5\text{ Digits}$

### Infrarotkamera FLIR ThermoVision™ A40-M



Temperaturbereich  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Genauigkeit  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}, \pm 2\text{ \%}$  vom Messwert

### 19“ Präzisions-Labornetzgerät SM45-140



Leistung  $I_{\text{max}} = 140\text{ A}; U_{\text{max}} = 45\text{ VDC}$

Wirkungsgrad  $90\%$

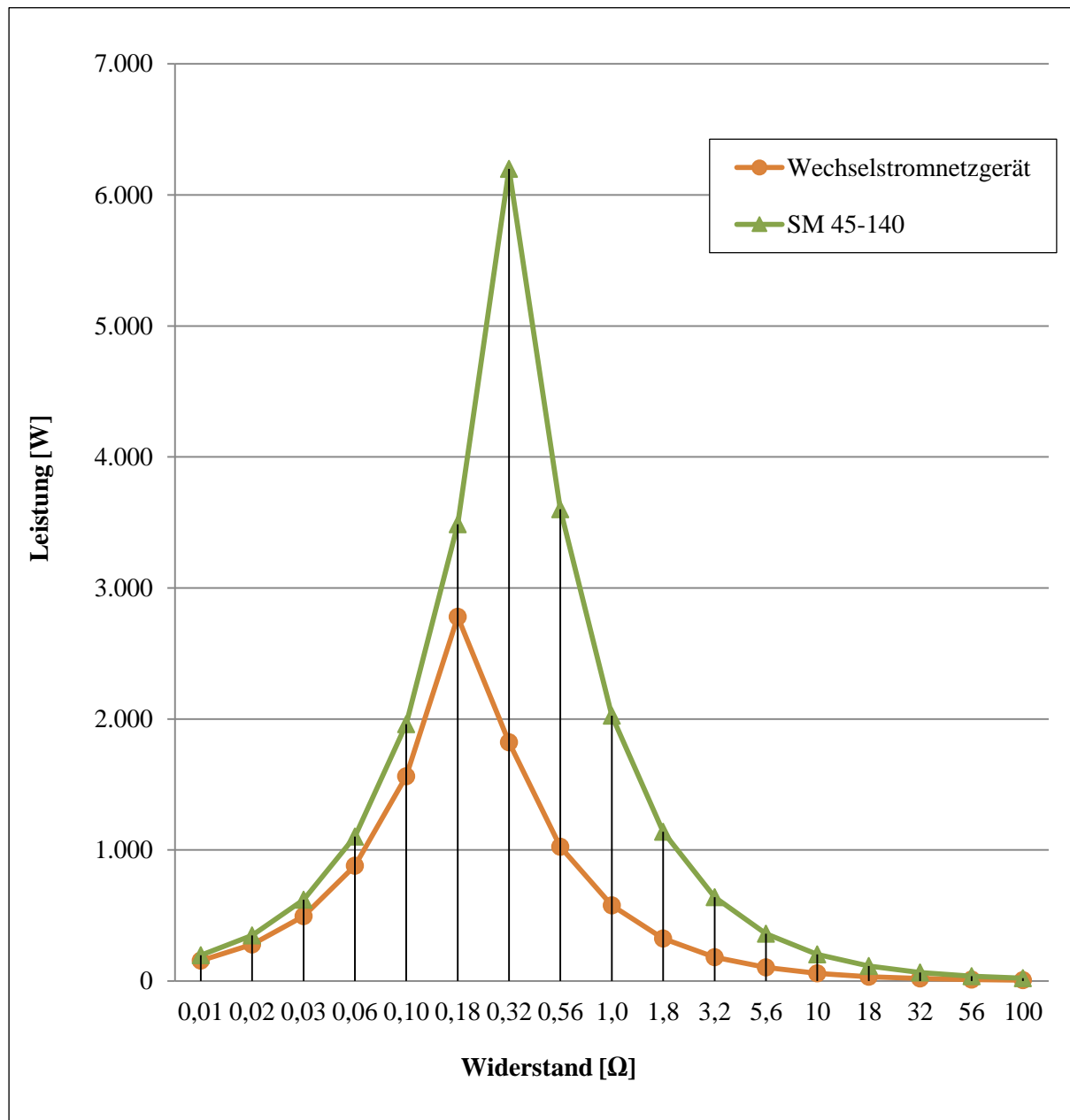
Genauigkeit  $0,5\text{ \%} + 2\text{ Digits}$

### Wechselstrom Labornetzgerät:



Leistung  $U_{\text{max}} = 24\text{ VAC}, P_{\text{max}} = 3\text{ kW}$

## 13.2 Leistungsübersicht der verwendeten Labornetzgeräte



### 13.3 Datenblätter HTS-Testmaterial



**SAERTEX® GmbH & Co. KG**  
 Brochterbecker Damm 52  
 D-48369 Saerbeck  
 phone: +49 (0) 2574 902-0  
 fax: +49 (0) 2574 902-209  
 e-mail: info@saertex.com

#### DATASHEET

(acc. to EN 13473-1)

STYLE NO.

**S32CX00K-00534-01270-264000**

DESCRIPTION OF STYLE

**BIDIAGONAL-CARBON-FABRIC**

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m <sup>2</sup> ]	TOLERANCE [+/- %]	MATERIAL
<i>upper side</i>			
+45°	267	+/- 13 g/m <sup>2</sup>	Tenax HTS
-45°	267	+/- 13 g/m <sup>2</sup>	Tenax HTS
<i>lower side</i>			
STITCHING:	6	+/- 1 g/m <sup>2</sup>	PES SC

BINDER: Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 1270

mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 540

g/m<sup>2</sup>

TOTAL TOLERANCE: +/- 27g/m<sup>2</sup> %

18.07.2011 PK

#### DATASHEET

(acc. to EN 13473-1)

STYLE NO.

**S37CQ25K-00500-01400-264000**

DESCRIPTION OF STYLE

**QUADRAXIAL-CARBON-FABRIC**

CONSTRUCTION	AREAL-WEIGHT [g/m <sup>2</sup> ]	TOLERANCE [+/- %]	MATERIAL
<i>upper side</i>			
+45°	125	5	Tenax HTS
0°	126	5	Tenax HTS
-45°	125	5	Tenax HTS
90°	125	5	Tenax HTS
<i>lower side</i>			
STITCHING:	4	5	PES SC

BINDER: Warp

GAUGES: 5

WIDTH: 2540

mm or in tapes

TOTAL AREAL WEIGHT: 505

g/m<sup>2</sup>

TOTAL TOLERANCE: 5,0 %

18.07.2011 CF

## 13.4 Prüfkörper: Kohlenstofffasergewebe in Thermoplastmatrix

Prüfkörper	Matrix	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke [mm]	Lagen-anzahl	Lagenaufbau (CF-Gewebe) Körper 1/2	Gewicht [g]	elektr. Widerstand [Ω]
CFPE663	PEEK	280	51,5	4,36	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	94	0,1668
CFPE664	PEEK	280	51,5	4,40	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	97	0,1640
CFPE665	PEEK	280	52,0	4,37	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	95	
CFPE666	PEEK	274	51,0	4,50	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	96	0,1660
CFPE667	PEEK	274	51,8	4,49	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	96	0,1610
CFPE668	PEEK	274	52,7	4,49	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	99	0,1570
CFPS669	PPS	260	52,0	4,38	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	92	
CFPS670	PPS	260	52,0	4,37	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	92	
CFPS671	PPS	260	51,0	4,38	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	90	
CFPS672	PPS	260	50,0	4,39	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	89	
CFPS673	PPS	260	52,0	4,40	14	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	93	0,1390
CFPS674	PPS	292	43,0	4,40	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	85	0,1610
CFPS675	PPS	292	55,0	4,40	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	109	0,1276
CFPS676	PPS	292	52,0	4,40	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	103	0,1380
CFPS677	PPS	292	54,5	4,39	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	106	0,1366
CFPS678	PPS	262	52,5	4,40	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	93	
CFPS679	PPS	273	51,0	4,36	14	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	94	
CFPS680	PPS	300	51,0	3,15	10	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0	74	0,1710
CFPS681	PPS	300	49,0	3,15	10	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0	72	0,1710
CFPS682	PPS	300	51,0	3,15	10	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0	76	0,1610
CFPS683	PPS	300	49,0	3,15	10	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;0/90;+/-;0/90	71	0,1310
CFPS684	PPS	299	49,5	3,15	10	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	73	0,1910
CFPS685	PPS	299	50,0	3,15	10	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	72	0,1690
CFPS686	PPS	299	49,0	2,81	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	65	0,1889
CFPS687	PPS	299	47,5	2,80	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	61	0,1910
CFPS688	PPS	299	49,0	2,81	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	65	0,1833
CFPS689	PPS	299	50,0	2,79	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	65	
CFPS690	PPS	270	53,0	2,80	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	62	0,1770
CFPS691	PPS	270	52,0	2,80	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	61	0,1810
CFPS692	PPS	270	52,0	2,80	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	61	0,1800
CFPS693	PPS	270	53,0	2,80	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0	62	
CFPS694	PPS	276	100,0	3,11	10	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0	133	
CFPS695	PPS	276	100,0	3,12	10	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;0/0;+/-;90/0;+/-;90/0	134	
CFPS696	PPS	276	101,0	2,83	9	90/0;+/-;90/0;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	122	
CFPS697	PPS	278	102,0	2,83	9	90/0;+/-;90/0;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	124	
CFPS698	PPS	270	80,0	2,83	9	0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	93	
CFPE699	PEEK	273	51,0	1,55	5	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	33	0,3130
CFPE700	PEEK	268	49,5	1,50	5	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	30	0,3450
CFPE701	PEEK	268	51,5	1,55	5	90/0;+/-;90/0;+/-;90/0	33	0,3160
CFPS702	PPS	285	31,0	2,15	7	0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0;	30	0,3360
CFPS703	PPS	285	29,0	2,16	7	0/90;+/-;0/90;+/-;90/0;+/-;90/0;	27	0,2720
CFPS704	PPS	276	29,0	2,80	9	90/0;+/-;90/0;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	35	0,2470
CFPS705	PPS	275	28,5	2,81	9	90/0;+/-;90/0;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90	34	0,2850
CFPE706	PEEK	285	52,5	4,45	14	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	101	0,1670
CFPE707	PEEK	284	53,0	4,45	14	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	102	0,1520
CFPE708	PEEK	284	54,0	4,45	14	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	103	
CFPS709	PPS	281	54,5	4,40	14	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	104	
CFPS710	PPS	284	55,0	4,39	14	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	106	0,1345
CFPS711	PPS	282	55,0	3,45	11	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	84	0,1500
CFPS712	PPS	282	54,5	3,45	11	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	82	0,1550
CFPS713	PPS	282	55,5	2,83	9	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	68	0,1720
CFPS714	PPS	275	54,0	2,83	9	+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;0/90;+/-;	65	0,1750

## 13.5 Prüfkörper: Kohlenstofffasergelege in Thermoplastmatrix

Prüfkörper	Länge [mm]	Breite [mm]	Dicke (prak- tisch) [mm]	Dicke (theoretisch) [mm]	Lagen- anzahl	Lagenaufbau (CF-Gelege)	Gewicht [g]	Dichte [kg/m³]
CFPSB01	254	91	1,95	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	65	1442,127
CFPSB02	255	91	1,94	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	65	1443,877
CFPSB03	255	91	1,95	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	65	1436,472
CFPSB04	255	91	1,95	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	65	1436,472
CFPSB05	301	91	1,98	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	77	1419,769
CFPSB06	300	91	1,98	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	77	1424,501
CFPSB07	301	91	1,93	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	76	1441,368
CFPSB08	300	91	1,97	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	76	1413,138
CFPSB09	301	91	1,98	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	77	1419,769
CFPSB10	301	91	1,97	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	76	1408,444
CFPSB11	301	91	1,98	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	76	1401,330
CFPSB12	300	91	1,98	1,92	12	90°/0°/-45°/+45°/90°/90°/90°/90°/-45°/+45°/0°/90°	76	1406,001
CFPSB13	301	45	1,93	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	37	1419,031
CFPSB14	301	45	1,93	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	37	1419,031
CFPSB15	301	91	1,96	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	76	1415,630
CFPSB16	301	90	1,87	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	73	1441,027
CFPSB17	301	91	1,99	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1412,634
CFPSB18	301	91	1,99	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	78	1430,980
CFPSB19	301	91	1,98	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1419,769
CFPSB20	301	91	1,97	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1426,976
CFPSB21	301	91	1,98	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1419,769
CFPSB22	301	91	2,00	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1409,094
CFPSB23	301	91	1,99	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1412,634
CFPSB24	301	91	1,98	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	76	1401,330
CFPSB25	301	91	1,99	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1412,634
CFPSB26	301	91	2,00	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1405,571
CFPSB27	301	91	1,98	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1423,363
CFPSB28	301	91	1,98	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	76	1404,878
CFPSB29	300	90	1,88	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	73	1438,140
CFPSB30	301	91	2,00	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1405,571
CFPSB31	301	91	1,99	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1412,634
CFPSB32	301	91	1,98	1,92	12	0°/90°/+45°/-45°/0°/0°/0°/0°/-45°/+45°/90°/0°	77	1419,769

## 13.6 Bedienoberfläche zur gesteuerten Stromeinleitung

The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Contains buttons for 'Schema starten' (Start Schema) and 'Schema speichern/ laden' (Save/Load Schema).
- Left Panel:** Includes input fields for 'Schritte:' (Steps) and 'Durchgänge:' (Runs), a progress bar for 'Vorgang:' (Process), and a table for 'Eingabe:' (Input) with columns for 'Kanäle + 1 bis 8', 'Kanäle - 9 bis 16', and 'Bestromung: AN in s / AUS in s'.
- Right Panel:** Features buttons for 'Start', 'Dauerbetrieb' (Continuous Operation), and 'Grundst.' (Basic), along with a 'STOPP' button.
- Bottom Right:** A 'Zeitenübersicht' (Time Overview) section showing 'Gesamtlaufzeit' (Total Runtime), 'Zykluslaufzeit' (Cycle Runtime), 'verstr. Gesamtzeit' (Elapsed Total Time), 'verstr. Zykluszeit' (Elapsed Cycle Time), 'Durchläufe' (Runs), and 'verbleibende Zeit' (Remaining Time).

**Callouts and Explanations:**

- Eingabe: Anzahl der durchzulaufenden Schritte:** Points to the 'Schritte:' input field.
- Eingabe: Anzahl der Durchläufe:** Points to the 'Durchgänge:' input field.
- Fortschrittsbalken für einen Durchgang und Gesamtprozess:** Points to the 'Vorgang:' progress bar.
- Eingabe: Parameter des geladenen Programmschemas (Kanäle sowie Ein- und Auszeit):** Points to the 'Eingabe:' table.
- Schrittanzeiger:** Points to the 'Schritte:' input field.
- Schritte können durch Aufziehen der Maske erweitert werden:** Points to the 'Schritte:' input field.
- Wechseln zur Dateiverwaltung:** Points to the 'Schema speichern/ laden' button.
- startet die Bestromungssteuerung:** Points to the 'Start' button.
- schaltet den Dauerbetrieb ein (Eingabe/Durchläufe wird nicht berücksichtigt):** Points to the 'Dauerbetrieb' button.
- setzt alle Kanäle zurück, z. B. nach Abbruch:** Points to the 'Grundst.' button.
- Signalisiert den aktiven Schritt:** Points to the green indicator lights next to the 'Eingabe:' table.
- Signalisierung der Spalte mit fehlender oder fehlerhafter Eingabe:** Points to the green indicator lights next to the 'Eingabe:' table.
- Zeitübersicht:** Points to the 'Zeitenübersicht' section.
- STOPP beendet das Programm nach Einzeldurchgang:** Points to the 'STOPP' button.

	Kanäle + 1 bis 8	Kanäle - 9 bis 16	Bestromung:	
			AN in s	AUS in s
1.	1	16	0,02	0,02
2.	2	15	0,02	0,02
3.	3	14	0,02	0,02
4.	4	13	0,02	0,02
5.	5	12	0,02	0,02
6.	6	11	0,02	0,02
7.	7	10	0,02	0,02
8.	8	9	0,02	0,02
9.	7	10	0,02	0,02
10.	6	11	0,02	0,02
11.	5	12	0,02	0,02
12.	4	13	0,02	0,02
13.	3	14	0,02	0,02
14.	2	15	0,02	0,02
15.	1	16	0,02	0,02
16.	0	0	0	0



### 13.7 Schaltplan für Kontaktklemmensteuerung

